



### 김 문 현

환경계획학과 도시및지역계획학

## 서울대학교 환경대학원

## 2023년 02월

# 수직 도시형태가 도시 기후에 미치는 영향 - 높이에서 체적까지 -

도시계획학 박사학위논문

## 수직 도시형태가 도시 기후에 미치는 영향 - 높이에서 체적까지 -

#### 지도교수 김 태 형

## 이 논문을 도시계획학 박사학위논문으로 제출함 2023년 02월

## 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 도시및지역계획학

## 김 문 현

## 김문현의 박사학위논문을 인준함 2023년 02월

위 원	녠장	김 세 훈	(인)
부위	원장	송 재 민	(인)
위	원	이 제 승	(인)
위	원	윤 동 근	(인)
위	원	김 태 형	(인)

초 록

도시형태는 인간 활동과 환경의 상호작용을 설명하는 주요한 요인이다. 전통적으로 도시형태에 관한 탐구는 대부분 수평적인 형태에 관심을 두었다. 도시 공간의 효율과 기능의 향상은 수평적 형태를 결정하는 주요한 요소였다. 그러나 효율과 기능에 의존한 수평적 형태는 열섬 효과와 같은 도시 기후의 변화를 충분히 설명하지 못하였다. 한편 최근 들어 도시의 수직형태에 대한 관심이 증가하고 있다. 수직 도시형태는 도시 기후에 영향을 미치는 주요한 요인으로 지목되고 있는데, 특히 도시 온도와 관련하여 일부 수직 도시형태 지표가 온도에 강력한 영향을 미친다는 연구결과가 보고된다. 하지만, 여전히 수직 도시형태에 관한 수용가능한 측정 기준이 불일치하고, 공간에서 일어나는 복잡한 상호작용은 설명하지 못하는 실정이다. 이에 이 연구는 수직 도시형태가 대기 온도에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

수직 도시형태가 대기 온도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 먼저 수용가능한 지표를 제안하였다. 도시의 수직형태가 도시 온도에 미치는 분명한 영향에도 불구하고, 아직 수직 도시형태와 온도의 관계를 설명하는 지표와 지표의 영향력을 체계적으로 제시하기에는 부족하다. 이에 선행연구를 검토하여 도시 온도를 조절하는 측정 가능한 수직 도시형태를 네 가지 지표로 제안하였다. 네 가지 지표는 알파벳 V로 시작하는 네 단어로 높이(Vertical), 높이 변위(Variance), 체적(Volume), 개방성(Vacant)이다. 제안된 지표는 기존 연구에서 도시형태가 도시 온도에 미치는 효과인 그늘, 열용량, 환기 성능을 조절하는 주요한 요인으로 지목되었다.

제안된 지표는 개별 및 상호관계 영향을 중심으로 분석되었다. 연구에 사용된 도시형태 지표는 도시형태가 온도에 미치는 다양한 효과를 살펴보기 위해 1차원(높이), 2차원(평면)과 3차원(체적) 지표를 모두 포함한다. 공간의 연속성을 고려하면 도시형태 지표 간에 상호작용이 발생하는 것은 필연적이다. 이에 지표 간의 상호관계를 고려하기 위해 딥러닝 모형을 분석에 사용하였다. 분석은 2-레이어 인공신경망으로 예측 모형을 구축하고, 이를 설명하는 분석 방법인 SHAP(SHapley additive explanation)를 통해 지표의 개별 및 상호관계에 대한 영향력을 도출하였다.

도시형태가 만드는 그늘 및 환기성능의 모순적인 효과와 도시형태

i

간의 상호관계는 도시 공간의 기류를 다양하고 복잡하게 만들어 일반화하기 어렵게 한다. 이에 수직 도시형태의 개별 및 상호작용 효과는 로컬규모의 도시형태 특성에 따라 다르게 나타날 가능성이 높다. 이를 식별하기 위해 이 연구는 로컬규모에서 도시형태 유형에 따른 도시형태 영향력의 차이를 살펴보았다. 예컨대, 저층건물 밀집지역과 고층건물 밀집지역에서 중요하게 나타나는 지표가 다르다면 온도를 완화하기 위해 다르게 접근해야 한다.

분석 결과 네 가지 수직 도시형태 지표는 도시의 대기온도에 유의미한 영향을 미치고 있었다. 여름철에는 공간의 개방성(Vacant)과 공간높이(Vertical)가 온도를 낮추는 중요한 지표였다. 고층 건물이 만드는 그늘효과와 도시의 개방성에 의한 환기성능이 열 쾌적성을 개선하는 데 도움을 주었다. 중요한 점은 개방성과 공간높이의 상호관계에서 발견된다. SHAP의 의존성 플랏을 통해 개방성과 공간높이의 관계를 살펴본 결과 개방성이 평균 이하인 지역과 평균 이상인 지역에서 공간높이에 대한 민감도가 다르게 나타났다. 전자가 후자에 비해 높이에 더 민감하게 반응하였는데, 개방성이 낮은 지역에서 건물높이가 낮을수록 온도의 급격한 상승이 목격된다. 공간높이가 낮고 건물이 밀집된 공간은 그늘효과나 환기성능과 같이 온도 저감 효과를 기대할 수 없어 온도가 급격히 상승하는 현상이 나타날 수 있다.

이 연구의 결과는 도시 캐노피 층 이하에서 공간 밀도를 낮게 유지하는 것이 로컬 규모에서 도시의 온도를 낮추는 좋은 대안이라는 것을 보여주었다. 공간 밀도는 개방성과 높이를 통해 조절할 수 있는 것으로 드러났다. 도시화와 온도의 관계를 살펴본 일부 연구는 공간밀도를 건물 체적과 동일시하여 온도에 양의 영향을 미치는 도시화의 부정적인 효과를 강조한다. 하지만 이 연구는 체적이 온도 증가에 미치는 영향에 비해 적절한 개방성에 의한 환기성능과 고층건물에 의한 그늘 효과를 향상시켜 도시의 온도를 저감할 수 있음을 밝혔다. 예컨대, 고층건물 밀집지역에서는 저층건물 밀집지역에 비해 총 건물 체적은 높지만 높은 건물이 그늘효과를 만들고 건물 사이의 충분한 간격이 환기성능을 향상시켜 온도가 저감될 수 있다. 이 결과는 공간밀도를 체적이 아닌 개방성과 공간높이의 상호 관계에 따라 이해해야 함을 보여준다.

개방성과 건물 체적, 공간높이와 높이 변위의 상호관계에서도 새로운 통찰이 발견되었다. 개방성과 건물 체적의 경우 개방성이 낮으면 대기 온도는 체적에 더 민감하게 반응하여 급증하는 지역이 나타났다. 공간높이와 높이 변위의 관계에서는 높이가 일정하고 낮은 지역에서 온도가 급격히 상승하는 현상이 발견되었다. 연구에서 설정한 수직 도시형태 지표는 체적과 높이 변위가 온도에 양의 영향을 미쳤지만, 개방성과 공간높이를 조절하여 온도가 급증하지 않게 하거나 낮추는 접근 방법이 있음을 시사한다.

또한, 이 연구는 로컬규모에서 도시형태 유형에 따라 도시형태가 온도에 미치는 영향이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 도시형태 유형은 가우시안 혼합 모형을 통해 다섯 가지 군집으로 구분되었으며, 각 군집의 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다: 군집 1은 높이가 일정한 저층건물 밀집지역, 군집 2는 작은 하천에 인접한 저층 및 중층 건물 밀집지역, 군집 3은 다양한 높이의 중층 및 고층 건물 밀집 지역, 군집 4는 개방감이 뛰어난 중층 및 고층 건물 조성지역, 군집 5는 녹지와 하천 인접지역. 각 군집의 도시형태 유형에 따라 수직 도시형태 지표의 중요도가 다르게 나타났다. 이는 도시형태 유형에 따라 지역의 온도 저감을 위한 실행 전략이 달라져야 함을 시사한다.

도시형태의 복잡한 상호관계는 기존 연구에서 제시된 연구의 결과를 일반화하여 도시공간에 적용하기 어렵게 만든다. 이 연구는 수직 도시형태 지표의 중요도와 지표 간의 상호관계에 대한 통찰을 제공하였다. 이를 통해 학술적 측면에서 수직 도시형태와 도시 온도의 관계에 대한 이해의 깊이를 더하였고, 실천적 측면에서 도시계획가와 설계자들에게 도시 온도 완화를 위한 바람직한 정책적 수단을 제시하였다. 도시의 물리적인 환경에 대한 변화는 손쉽게 하향식으로 적용할 수 없으므로 신중한 접근이 필요하다. 또한, 자원의 한계가 있으므로 방법의 우선순위를 두고 적용해야 한다. 이 연구의 결과는 도시가 보다 나은 열 환경을 조성할 수 있도록 도울 것이다.

#### 주요어 : 수직 도시형태, 대기 온도, 도시기하학, 도시형태의 상호작용 효과, 도시 온도 완화

학 번:2019-33816

목 차

iv

제 5 장 연구 결과	93
제 1 절 기초 통계	93
1. 종속 변수	93
2. 설명 변수	94
제 2 절 수직 도시형태의 효과 분석	100
1. 대상지 현황	100
2. ANN 분석 결과	102
3. SHAP 분석 결과	104
제 3 절 도시형태 유형 군집	114
1. 군집 개수 선택	114
2. 군집분류 결과	116
3. 군집 특성	121
제 4 절 도시형태 유형에 따른 온도 변화	129
1. 군집 1: 높이가 일정한 저층 건물 밀집지역	129
2. 군집 2: 작은 하천에 인접한 저층 및 중층 건물 밀집 지역	131
3. 군집 3: 다양한 높이의 중-고층 건물 밀집 지역	133
4. 군집 4: 개방감이 뛰어난 중-고층 건물 조성 지역	135
5. 군집 5: 녹지와 하천 인접 지역	137
제 6 장 토의	139
제 1 절 수직 도시형태 지표의 영향	139
제 2 절 도시형태 지표의 상호작용	144
제 3 절 도시형태 유형	148
제 7 장 결론	156
제 1 적 이론적 기여	156
제 2 적 정책적 한의	160
제 2 전 여구이 하게	163
제 0 월 만두어 한계	100
브로 [ 그지 서느 거즈	16/
부록 [. 군집 성능 검증	164
부록 I. 군집 성능 검증 부록 II. 도시형태 변수의 군집별 분포도	164 176
부록 I. 군집 성능 검증 부록 II. 도시형태 변수의 군집별 분포도	164 176
부록 I. 군집 성능 검증 부록 II. 도시형태 변수의 군집별 분포도 참고 문헌	164 176 178
부록 I. 군집 성능 검증 부록 II. 도시형태 변수의 군집별 분포도 참고 문헌	164 176 178

## 표 목차

[표 4-1] 서울시 건물 층수 기준	
[표 4-2] S-DoT 측정 정보	60
[표 4-3] 기본 연구에서 사용된 도시형태 변수(로컬 규모)	
[표 4-4] 연구 투입 변수 리스트 및 출처	
[표 5-1] 대기온도 기술 통계량	
[표 5-2] Descriptive statistics	
[표 5-3] 이분산성 및 시계열 자기상관 검정 결과	101
[표 5-4] ADF 단위근 및 하우스만 검정 결과	101
[표 5-5] ANN parameter	102
[표 5-6] 트레이닝 데이터와 테스트 데이터에 대한 RMSE, MAE, MAPE	
[표 5-7].군집별 평균, 최소, 최댓값	120
[표 6-1] 여름과 겨울 모형의 변수 영향력 결과	143
[표 6-2] 군집 1의 도시형태 특성 요약	151
[표 6-3] 군집 2의 도시형태 특성 요약	152
[표 6-4] 군집 3의 도시형태 특성 요약	153
[표 6-5] 군집 4의 도시형태 특성 요약	154
[표 6-6] 군집 5의 도시형태 특성 요약	
	1/5
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과	
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-value)	165 Jes) 165
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과	165 Jes) 165 166
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro Willio Kruscal Wallis 검정 결과	165 Jes) 165 166 Jes) 166
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과	165 Jes) 165 166 Jes) 166 167
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro Wilk와 Kruscal Wallis 검정 결과	165 ues) 165 166 ues) 166 167 ues) 167
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과	165 ues) 165 166 ues) 166 167 ues) 167 169
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu	165 ues) 165 ues) 166 ues) 166 167 ues) 167 ues) 169 ues) 169
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과	
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu	165 ues) 166 ues) 166 166 ues) 167 ues) 167 ues) 169 ues) 169 ues) 170 lues) 170
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-11] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-12] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-12] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu)	
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-11] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-12] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-12] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-13] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과	
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-11] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-12] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-13] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu)	
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-11] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-12] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-13] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-15] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-15] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과	
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-11] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-12] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-13] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-15] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-15] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-15] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu	
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-11] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-12] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-13] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-15] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-17] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-15] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu)	
[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-3] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-11] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-12] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-13] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-15] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-17] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-valu [표 I-17] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과 [표 I-17] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과	

## 그림 목차

[그림 2-1] 케빈 린치의 규범적 도시형태	8
[그림 2-2] 크리스토퍼 알렉산더의 15th 패턴	9
[그림 2-3] 수평 및 수직 도시형태 속성을 반영한 네트워크 복잡성	13
[그림 2-4] 도시 에코시스템의 입력 및 출력 요인	15
[그림 2-5] 표면 거칠기에 의해 형성된 도시의 경계층 구조	
[그림 2-6] 로컬기후존 분류	19
[그림 2-7] 시스템의 내부 에너지 흐름	
[그림 2-8] 도시 내 에너지 이동 및 균형	22
	(0
[그림 3-1] 건물 가상자리와 건물 사이 엽꼭에서 나타나는 바람 흐름 보직도	40 41
[그림 3-2] 신굴 필도와 걸 에너지 관계	
[그림 2~] 공식률이 중철한 두 시력의 중신 개성감 사이 도식도	
[그님 3-4] 메들던 도시와 시나티오에 따른 월점 경도 먼와	
[그림 4-1] 서웈의 토지이용 분류	49
[그림 4-2] 서울시 고층 건물 밐집지역	
[그림 4-3] 서울의 중층 및 저층 건물 밀집지역	
[그릮 4-4] 서울의 토지이용	
[그림 4-5] 1971~1974년에 건설된 반포1단지 전경	
[그림 4-6] 서울의 건물 형태	
[그림 4-7] 홍콩의 도시설계 가이드라인	56
[그림 4-8] 버퍼존 샘플 레이아웃	59
[그림 4-9] S-DoT 센서 외관	61
[그림 4-10] 설치된 S-DoT	61
[그림 4-11] 서울시에 설치된 1,058개 S-DoT 측정 센서 위치	
[그림 4-12] 여름데이터의 이상치 제거 전후 분포	63
[그림 4-13] 겨울데이터의 이상치 제거 전후 분포	64
[그림 4-14] 서울의 토지이용 분류	66
[그림 4-15] 건물 높이정보를 반영한 GIS 건물 레이어 예시	67
[그림 4-16] 건물 높이 데이터	67
[그림 4-17] DSM과 DEM 비교	68
[그림 4-18] DSM in Seoul	69
[그림 4-19] 분석 과정	71
[그림 4-20] 인공신경망 모형 개념도	72
[그림 4-21] 신경망 모델의 활성화 함수(Golshani et al., 2018)	73
[그림 4-22] TreeExplainer 기반 로컬 해석(local interpretation) 과정	77
[그림 4-23] 사망 위험에 대한 수축기 혈압의 SHAP value 그래프	
	-
[그럼 5-1] 선제 노시형태 변수의 상관관계 그래프	
[그럼 5-2] 죄송 선정된 도시형태 변수의 상관관계 그래프	
[그림 5-3] 수직 도시형태 변수 문포도	

[그림	5-4] 수평 도시형태 변수 분포도	. 99
[그림	5-5] 예측 모형의 loss 변화	103
[그림	5-6] 테스트 데이터의 마지막 200개 값의 관측치와 예측치 그래프	104
[그림	5-7] SHAP force plot	105
[그림	5-8] 여름 모형의 Feature importance	106
[그림	5-9] 여름 모형의 개방성 변수 SHAP dependence plot	107
[그림	5-10] 여름 모형의 SHAP dependence plots	110
[그림	5-11] 겨울 모형의 Feature importance	111
[그림	5-12] 겨울 모형의 SHAP dependence plots	113
[그림	5-13] BIC 점수 계산 결과	114
[그림	5-14] 군집 분류 3D 산점도	115
[그림	5-15] 군집별 상자그림	119
[그림	5-16] 군집 1: 높이가 일정한 저층건물 밀집지역	121
[그림	5-17] 군집 2: 작은 하천에 인접한 저-중층 밀집 지역	122
[그림	5-18] 군집 3: 다양한 높이의 중-고층 건물 밀집 지역	123
[그림	5-19] 군집 3: 다양한 높이의 중-고층 건물 밀집 지역	124
[그림	5-20] 군집 5: 녹지와 큰 하천 인접 지역	125
[그림	5-21] 군집 분류 결과	126
[그림	5-22] 수직 및 수평 도시형태 변수의 군집별 방사형그래프	127
[그림	5-23] 수직 및 수평 도시형태 변수 평균 값의 군집별 데이터 방사형그래프	128
[그림	5-24] 군집 1의 여름 및 겨울 SHAP value 분석 결과	130
[그림	5-25] 군집 2의 여름 및 겨울 SHAP value 분석 결과	132
[그림	5-26] 군집 3의 여름 및 겨울 SHAP value 분석 결과	134
[그림	5-27] 군집 4의 여름 및 겨울 SHAP value 분석 결과	136
[그림	5-28] 군집 5의 여름 및 겨울 SHAP value 분석 결과	138
[그림	6-1] 공간높이에 대한 SHAP dependence plot	144
[그림	6-2] 개방성이 평균 이하인 지역에서 공간 높이에 대한 SHAP value 산포도.	144
[그림	6-3] 개방성이 평균 이상인 지역에서 공간 높이에 대한 SHAP value 산포도.	144
[그림	6-4] 건물 제적에 대한 SHAP dependence plot	145
[그림	6-5] 개방성이 평균 이하인 지역에서 건물 제석에 대한 SHAP value 산포노.	145
[그림	6-6] 개방성이 평균 이상인 지역에서 건물 제석에 대한 SHAP value 산포노.	145
[그림	6-7] 공간높이에 대한 SHAP dependence plot	147
[그림	6-8] 건물 높이자이가 평균 이하인 지역에서 공간 높이에 대한 SHAP value 산포노	147
[그림	6-9] 건물 높이자이가 평균 이상인 시억에서 공간 높이에 대한 SHAP value 산포노	147
[77]	I 1] 그지법 Worting) 버스이 키너 미드 그래파(지) Dorr alat(인)	164
[그림	I-1] 군접될 Vertical <sub>DSM</sub> 변구의 기될 될도 그대프(와), BOX-plot(우)	104 166
[그림 [그린	1-4] 고점 # 10111111005Mng 민구귀 기관 된도 그네프(平), DOX-PIOT(十)	167
[그림 [그리	I 기 고 비 = Valiance 킨ㅜㅋ / 글 글도 그네프(꾹), DOX-piol(ㅜ) I-/ 그지벼 Volume 벼스이 쿼너 미드 그레프(지) Pov-viot(ㅇ)	10/ 160
[그림 [그린	I-1 고 1 년 VOIUIILE 친구가 기 년 원도 그네프(과), DOX-PIOU(구)	170
니스럽	I 기 신법	1/0

[그림 I-6] 군집별 Density<sub>Imperv</sub> 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우) ..... 171 [그림 I-7] 군집별 Diversity<sub>Entropy</sub> 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우) ... 172

[그림 I-8] 군집별 Diversity <sub>Blue</sub> 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)	174
[그림 I-9] 군집별 Design <sub>Road</sub> 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)	175
[그림 II-1] 수직 도시형태 변수의 군집별 분포도	176
[그림 II-2] 수평 도시형태 변수의 군집별 분포도	177

#### 제1장서 론

#### 제 1 절 연구의 배경

지난 반세기 동안, 전 세계는 급속한 도시화를 경험했다. 도시화는 도시인구의 증가를 통해 분명히 드러난다. 1960년 1.02 billion에 불과했던 전 세계 도시 인구는 60년이 지난 2021년에는 4.43 billion까지 증가하였다. 이는 전 세계 인구의 57퍼센트에 달한다(World bank, 2022). 도시인구의 증가는 규모 뿐 아니라 밀도에서도 발견된다. 일반적으로 도시의 생산성 수준은 인구 크기에 비례하여 성장하였는데(OECD, 2015), 밀도의 집적효과는 생성산을 보다 증가시켰다. 인구밀도가 두 배 증가하면 생산성이 15%까지 증가하는 것으로 보고된다(Morikawa, 2011).

도시 인구가 급격히 증가함에 따라 대두된 도시화 현상은 집중론자(Centrists, e.g. 르 꼬르뷔지에)와 탈집중론자(Decentrists, e.g. 프랭크 로이드 라이트)<sup>①</sup>의 두 가지 상반된 입장으로 나뉘어 발전해 왔다. 집중화와 탈집중화는 도시 성장 담론에서 각각 압축 개발(Compact development)과 분산 개발(Dispersal development)로 도시 개발을 개념화하였다. 바람직한 도시 개발에 대한 두 모델 간의 경쟁은, 1987년 브룬트란트 위원회 보고서가 '지속가능한 개발'의 우선 순위를 강조하면서 압축 개발을 도시계획에 적용하는 입장이 우세해지기 시작하였다(Breheny, 1996). 압축 개발된 도시를 지칭하는 압축 도시는 1970년대 Dantzig and Saaty(1973)가 처음 사용하기 시작하였다. 압축도시는 도시 스프롤, 즉 도시가 무분별하게 확장 개발되면서 인구와 상업을 잃은 도심 지역이 황폐화되고, 도시 주변부와 농촌 지역에서 자연 또는 반 자연 식생이 파괴되거나 단편화가 나타나는 현상(Johnson, 2001)을 해결하기 위한 고밀도, 혼합적 토지이용 지향형 도시를 의미한다.

압축도시는 토지를 혼합적으로 이용하고 토지 이용을 대중 교통 서비스와 통합하여 최대화된 효율성을 추구한다. 압축 개발이 에너지 효율적이고 오염이 적게 발생하며(Ewing and Hamidi, 2015), 혼합적 토지이용을 통해

<sup>&</sup>lt;sup>①</sup> Breheny(1996)는 집중론자를 스프롤을 비판하고 고밀도 도시가 주는 유익을 지지 하는 사람으로, 탈집중론자를 분산형 도시를 선호하는 사람으로 정의한다.

단위통행거리가 감소하고 있다는 사실(Gim, 2013)이 경험 연구를 통해 증명되었다. 또한, 무분별한 확장을 방지함으로써 보전된 녹지와 수 공간(Green and blue space)은 열섬현상 완화(Bounoua et al., 2015; O'Neill et al., 2009), 대기오염 농도 저감(Escobedo & Nowak, 2009; Pugh et al, 2012) 등 도시의 미기후를 개선하는 데도 효과적이다. 이러한 이유로 도시의 수평적인 확장을 막고 압축 도시를 개발하며 얻는 혜택이 도시 계획 분야의 지배적인 담론으로 자리잡았다.

압축도시가 도시계획의 새로운 패러다임이 되면서 도시 규모의 수평적인 확장이 제한되기 시작하였다. 인적자원의 집적화로 인한 혜택을 포기할 수 없었던 도시는 자연스럽게 도시의 수직적 확장에 눈을 돌리기 시작하였다. 도시의 수직화는 인구 천만 명 이상의 메가시티가 탄생한 배경이다. 메가시티는 1950년에 뉴욕과 도쿄 두 곳에 불과했지만, 2022년에 그 수가 44개로 증가했으며, 도쿄, 델리, 상하이, 멕시코시티와 상파울루에는 각각 2천만 명이 넘는 인구가 거주한다(OECD, 2015; Demographia, 2022). 특히, 아시아의 비OECD 개발도상국과 신흥국(developing and emerging non-OECD) 경제에서 메가시티의 수가 빠르게 증가하였다. 2022년 기준 전 세계 상위 10개 메가시티 중 8개 도시가 아시아에 위치하는 것으로 나타난다(Demographia, 2022). 문제는 경제성장을 중심으로 개발된 메가시티에서 다양한 환경 문제가 발생하고 있다는 점이다.

도시의 온도 상승은 도시화로 인해 나타나는 대표적인 환경 문제이다. 선행연구는 이러한 차이가 지역의 물리적인 환경에 의존하는 것으로 보고한다(Oke, 1973; Kalnay and Cai, 2003; Zhang et al. 2010; Kim et al., 2019). Oke(1973)는 도시, 타운(town), 마을(village) 단위에서 인구 규모가 커질수록 열섬 효과 강도가 증가하고 있음을 밝혔다. 보다 도시화된 지역에서 온도가 증가하는 경향을 보이는데, 도시화로 인한 토지이용의 변화를 주된 원인으로 꼽는다(Kalnay and Cai, 2003). 중국의 상하이를 대상으로 한 연구에서도 도심과 교외 지역의 온도 차이가 도시화가 진행될수록 심화되었다(Zhang et al. 2010). 도시 내에서 지역에 따라 온도 상승의 강도가 다르게 나타나기도 한다. 도시 계획 변화에 따른 서울 3개 도심지의 온도 변화를 살펴본 결과, 새롭게 개발된 두 개의 도심이 전통적인 도심에 비해 뚜렷한 온도 상승 추세를 보였다(Kim et al., 2019).

특히, 많은 메가시티가 도시화 과정에서 받아들인 고층 건물 개발 패턴(high-rise development pattern)은 도시 기후에 상당한 변화를 초래하였다(Yang and Chen, 2020). 평평한 땅 위에 세워진 도시의 수직적인 형태가 대기의 흐름을 바꾸었다. 건물의 밀도와 높이가 기류와 표면 사이에서 발생하는 마찰력을 수정하여 대기층을 나누고 층 안에서 일어나는 공기역학적 메커니즘을 수정하였다(Oke, 2002). 그렇게 수정된 대기는 지표면 부근에서 도시의 형태(morphology), 재질(materiality), 그리고 녹지와 수 공간과 같은 지형적 특징과 상호 작용하여 대류, 복사, 증발 효과의 강도에 다시 영향을 미쳤다. 이 과정에서 도시 형태에 따라 형성되는 대기 경계층(Boundary-layer)이 에너지 플럭스 수정의 강도와 분포를 변화시키는 역할을 하였다(Gunawardena et al., 2017).

수직 도시 형태에 의해 만들어지는 기하학적 구조는 도시에서 나타나는 열섬 효과에 영향을 미치는 중요한 요인이다. 도시 온도 조절에 대한 도시 기하구조의 주요한 효과는 복사와 대류에 의해 일어나는 열교환을 수정하는 것이다(Lai et al., 2019). 고층건물이 밀집한 지역은 건물의 간섭으로 태양 복사의 입사를 막고 풍속이 저하되어 열교환이 수정된다. 이러한 온도 조절 효과를 살펴보기 위해 도시 기하구조를 도시 형태 변수로 사용하기 시작하였다. 거칠기 길이(Roughness length, Z0), 하늘시계지수(Sky-view factor, SVF)와 종횡비(Height-to-width, H/W) 변수는 수직 도시 형태의 효과를 설명하는 널리 알려진 변수이다(Charalampopoulos et al., 2013; Shih et al., 2017; Martinelli and Matzarakis, 2017; Ryu and Baik, 2012; Marciotto et al., 2010).

도시 형태의 수직화가 기후에 미치는 부정적인 영향은 도시의 지속가능성을 심각하게 위협한다. 그러나 지금까지는 도시 형태의 수평적인 측면에서 토지이용과 건조된 면적의 영향을 살펴보는 데 보다 초점을 두어 도시 형태의 강도를 적절히 반영하지 못하였다(Yang and Zhao, 2022). 수직 도시형태의 중요성에도 불구하고 여전히 도시 지리학에 뿌리 깊게 남아 있는 평면적 사고(McNeill, 2020)는 도시기후에 대한 온전한 접근을 방해하고 있다. 일부 연구에서 수직 도시 형태의 영향을 설명하기 위해 노력하지만 아직 도시기후에 대한 수직 도시형태의 형태학적 개념이 체계화되지 않았고, 컴퓨팅 성능과 데이터 접근성의 한계로 일부 변수(i.e., Z0, SVF, H.W)에

의존하는 경향을 보인다.

로컬규모에서 나타나는 도시기후에 대한 수직 도시형태의 상호작용도 지금까지 간과되었다. 도시 경계층 내부에서 다양한 수직적 형태의 상호작용으로 생성되는 다양하고 복잡한 기류가 열 에너지 흐름에 미치는 비선형적인 영향은 쉽게 결론 내리기 어렵다(Merlier et al., 2018; B. Zhou et al., 2017; X. Zhou et al., 2018). 지금까지 도시의 기하학적 형태를 다룬 대부분의 연구는 단일 건물이나 블록 수준에서 발생하는 개별 요인의 온도 조절 효과에 집중하였다. 그러나 보다 도시계획적인 함의를 갖기 위해서는 수직 도시 형태의 개별 및 상호작용에 대한 통찰력이 필요하다. 수직 도시형태의 영향을 식별하는 것은 물리적인 수직 개발 과정을 통제하기 위한 전략과 정책에 토대가 되는 정보를 제공하므로 도시 계획과 관리를 위해 매우 중요하다(Shirowzhan et al., 2018).

#### 제 2 절 연구의 내용

이러한 배경에서 이 학위 논문은 다음의 연구 질문을 중심으로 논의를 진행한다.

• 연구 질문: 수직 도시 형태가 도시 대기온도에 어떠한 영향을 미치는가?

연구 질문에 접근하기 위해 제2장에서는 도시의 형태와 기후에 대한 기존의 이론과 연구를 검토한다. 먼저 기능에 초점을 두고 수평적 측면에서 발전해오던 도시형태의 이론적인 배경과 수직 도시형태에 관한 주요한 연구 흐름을 살펴보았다. 이후 도시기후를 정의하면서 도시 형태와 관련된 도시기후의 열 에너지 균형 이론을 다루고, 열 에너지 균형에 영향을 미치는 도시 형태의 특성을 논의하였다. 더불어 도시 형태 특성에 따라 도시의 온도 조절이 어떻게 일어나는지 선행연구를 통해 검토하였다.

제3장에서는 이론적 배경과 선행연구에 대한 고찰을 바탕으로 연구가 필요한 지점에 관하여 논의하였다. 이 과정에서 수직 도시형태의 복잡한 상호작용과 공간 이질성을 탐색하는 것이 이 연구의 주요한 목적으로 도출되었다. 이에 연구의 목적을 토대로 하위 질문을 구성하고, 연구 질문에 접근하기 위한 첫 번째 단계로써 수직 도시형태 지표를 제안하였다. 제안된 수직 도시형태 지표는 네 개의 V로 시작하는 4Vs(Vertical, Variance, Volume, Vacant)이며, 선행연구를 통해 도시기후에 미치는 영향을 구체적으로 제시하였다. 이후 질문에 접근하기 위한 연구의 범위와 연구 변수를 선정하였다.

제4장은 연구 가설을 검증하기 위한 방법론을 설명하였다. 연구의 대상지와 사용한 변수의 출처 및 특성을 보여주고, 어떠한 방법을 사용하는지 설명하였다. 이 연구의 분석 대상은 한국의 서울이다. 서울은 다양한 수직 도시형태가 나타나는 도시로 이 연구의 대상지로 선정되기에 충분하다. 데이터는 수직 도시형태와 대기 온도의 관계를 분석하기 위해 관측, 지리정보시스템(Geographic information systems, GIS), 그리고 인공위성 원격탐사(Remote sensing) 데이터를 복합적으로 활용하였다.

연구 질문에 접근하기 위한 방법은 먼저 수직 도시형태 요소의 개별 및 상호작용 영향을 살펴보기 위해 대기 온도에 영향을 미치는 도시 형태

변수의 영향력을 도출하였다. 비정형적이고 다양한 종류의 데이터를 처리하기 위해 딥러닝에 기반한 인공신경망(Artificial neural network, ANN) 예측 모형을 구축하였으며, SHAP(SHapley Additive exPlanations)으로 변수의 영향력을 식별하였다. 수직 도시형태의 공간 이질성은 군집화 방법을 통해 확인하였다. 수직 도시형태 지표를 중심으로 표본을 몇 가지 도시 형태로 유형화하였다. 도시형태의 유형화는 GMM(Gausian Mixture Model)을 사용하였으며, 분류된 군집의 도시형태 특성을 살펴보았다.

제5장은 연구의 분석 결과를 보여준다. 연구 결과는 1) 분석에 사용한 데이터의 기초통계, 2) 수직 도시형태의 영향력 분석, 3) 도시형태 유형 군집과 4) 도시형태 유형에 따른 변수의 중요도를 살펴보았다. 연구 결과에 대한 토의는 6장에서 논의되었다. 이 연구에서 제안한 수직 도시형태 4Vs 지표의 영향력과 도시형태 지표의 상호작용에 관하여 주요하게 다루었다. 더불어 도시형태 군집과 변수의 중요도 결과를 바탕으로 바람직한 도시계획 전략을 논의하였다. 제7장에서는 연구 결과에 대한 이론적이고 정책적인 기여를 정리하고 연구의 한계를 서술하였다.

#### 제 2 장 이론적 배경 및 선행연구 고찰

#### 제 1 절 도시형태

인간이 정주하는 도시의 공간 구조는 사회 구조와 공존하여 서로에게 영향을 미친다(Hiller and Hanson, 1984). 공간 구조(Spatial structure)는 물리적인 건조환경(Built Environment)에 의해 구조화된 도시의 물리적인 구조를 의미하고, 사회 구조(Social structure)는 인간들이 상호 합의한 일반적인 사회 현상을 의미한다. 도시의 공간 구조와 형태가 인간 사회에 미치는 데 드러난 영향은 오랫동안 주로 사회구조와의 상호작용에 관심이 있었으며 물리적으로 평면적 속성을 주요한 요인으로 다루었다. 인간 사회의 가치(e.g., 효율적인 도시 구조)가 도시 형태에 반영되거나 도시의 구조가 인간의 행동(e.g., 이동성)을 통제 혹은 상호작용하는 지점에 연구가 집중되었다.

케빈 린치(1984)는 "좋은 도시 형태란 무엇인가?(What makes a good city?)"라는 물음에 답하기 위해 B.C. 3,500년 경 세워진 최초의 도시인 우르(Ur)에서부터 현대에 이르기까지 도시의 형태를 탐구하였다. 린치는 도시가 수평적으로 어떠한 구조를 가지고 있는지에 초점을 두고 과거의 도시 형태를 종합하여 도시 형태에 관한 세 가지 규범적인 이론을 제시한다. 세 가지 이론은 코스믹(Cosmic), 실용적(Practical), 그리고 오가닉(Organic) 형태이다.

코스믹 형태는 힘과 질서의 위계를 강조하는 하향식 구조의 기하학적 패턴을 보여준다. 중국을 비롯한 동아시아와 인도 문명이 가진 철학이 도시 형태를 통해 잘 드러난다. 실용적 형태는 격자형 도로를 바탕으로 규칙적이고, 기능적이며 효율적인 배치를 중시한 것이 특징이다. 도시를 정확한 예측을 바탕으로 맞물려 돌아가는 기계로 생각하여 부품의 기능이 어우러져 전체 도시를 이루는 것으로 이해하였다. 오가닉 형태는 지형에 의존하여 자생적으로 성장하여 비 정형적인 형태를 가진 도시를 의미한다(Lynch, 1984).



[그림 2-1] 케빈 린치의 규범적 도시형태: (a) 코스믹 형태, (b) 실용적 형태, (c) 오가닉 형태

도시 형태의 기능적 목적에 관심을 두었던 실용적 형태의 도시는 근대 이후 도시의 전형이다. 산업혁명으로 도시에 인구가 집중되면서 보다 효율적이고 기능 중심적인 도시 건설이 요청되었다. 예컨대, 격자 구조 공간은 공간의 효율성과 기능성의 수준을 한층 향상시킬 수 있는 좋은 수단으로 주목받았다. 격자 구조는 따로 떨어진 공간을 서로 상호작용할 수 있도록 이어줌으로써 공간의 기능을 중첩시킬 수 있었다. 그리고 공간의 중첩된 기능은 기존의 장소에 풍부하고 새로운 의미를 탄생시켰다(Alexander, 1965).

공간의 기능과 의미를 정리한 대표적인 연구는 1977년 크리스토퍼 알랙산더(Christopher Alexander)가 제안한 패턴 언어이다(Alexander, 1977). 그는 공간의 물리적인 형태와 기능을 중심으로 공간을 만들어내는 도시 구조의 패턴을 253개로 요약하고, 패턴을 조합하여 공간이 갖는 패턴 언어를 제안하였다. 패턴 언어는 수평적인 측면에서 도시 형태의 물리적 형태와 의미를 세세하게 정리하였다. 한편 알렉산더는 수직 도시형태를 가치 있게 바라보지 않았다. 그는 높은 건물이 사람들의 마음과 감정을 훼손할 뿐이므로 높이를 4층 이하로 제한할 필요가 있다고 평가한다(Alexander, 1977: 115).



Our neighborhood, compared with a typical part of a grid system.

[그림 2-2] 크리스토퍼 알렉산더의 15<sup>th</sup> 패턴: Neighborhood boundary

공간 구조와 사회 구조의 관계는 Hillier et al. (1989)에 의해 체계화되었다. Hillier의 공간에 대한 이해는 공간구문론(Space syntax)에서 잘 드러난다. 공간구문론은 공간 구조와 사회 구조의 관계를 밝히기 위해 정량적으로 측정 가능한 공간 구조를 통해 사회 구조의 변화를 정량화 하려는 시도이다. 기본적으로 사회구조의 변화가 공간구조에 변화에 의존한다는 데 전제한다. 공간구문론은 공간 구조의 속성이 공간사용패턴과 상호 관련성이 있음을 밝혔다(김영욱, 2003).

공간구문론은 물리적인 접근성을 주요한 지표로 다룬다. 공간구문론이 처음 등장한 1980년대에는 사회적 접근은 거의 물리적인 접근에 기반하였다(박근송, 2018). 그렇기에 인간의 이동 패턴을 분석하여 공간 구조와 사회 구조의 관계를 이해하는 시도가 주를 이루었고 실제로 이동 패턴을 예측하는 데 탁월한 성능을 보였다. 공간구문론은 이동패턴을 분석하기 위하여 물리적인 구조와 인간 이동 행태를 고려하였다. 물리적인 구조는 깊이(Depth), 연결도(Connectivity), 통합도(Integraion), 통제도(Control value), 명료도(Intelligibility)<sup>2</sup> 를 정량적으로 측정하여

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 깊이는 공간 네트워크에서 연결성의 수치적 개념으로 공간 이동을 위해 통과 해야 하는 축선(공간을 잇는 직선)의 수를 의미한다. 평균 깊이가 크다는 것은 접근성이 떨어진다는 의미이다(김영욱, 2003). 연결도는 이웃한 단위 공간의 수 를 의미하며, 연결도가 좋다는 것은 주변의 교통의 중심적인 역할을 한다는 뜻 이다(이범동 외, 2020). 통합도는 단위 공간에서 다른 모든 공간에 접근하기 위 해 통과해야 하는 공간 수의 평균이다. 특정 지역의 평균 통합도가 클수록 지역 의 공간이 서로 통합되어 있음을 의미한다(김영욱, 2003). 통제도는 공간 간의 상호관계를 수치적으로 표현한 값으로 연결도가 n개인 공간은 n개의 공간으로

공간의 위상학적 관계성을 분석하였다(이범동 외, 2020). 인간 이동 행태는 이동거리와 같이 통행행태에 영향을 미치는 요소로 물리적인 연결성 지표인 깊이에 이동 각도 및 거리에 가중 개념을 반영하였다(Turner et al., 2001).

도시의 이동성은 수평적인 도시 공간의 효율을 높이고 도시 공간의 특성을 드러내는 중요한 요소 중 하나이다. 건물과 공간은 서로 상호작용하여 도시의 체계를 구성하고, 그 사이를 잇는 이동체계가 도시에 색을 입힌다(Bacon, 1967). Penn et al. (1998)은 공간구문론을 활용하여 도로연결성을 중심으로 공간의 기능적 구조와 도시의 이동성을 살펴보았다. 런던을 대상으로 도시의 중심지와 인접 도시의 기능을 도로 연결 강도를 통해 살펴봄으로써 중심지를 비롯한 도시의 기능적 구조가 잘 설계되었는지 식별하고, 이동성과 공간 구조의 관계를 밝혔다. 이 연구는 그리드 구조가 보행자 이동 패턴을 발생시키고 거리에서 발생하는 거래를 활성화하는 이점이 있다고 강조한다.

자동차가 주요한 통행수단으로 등장한 이후 이동성은 도시 건설의 중요한 목적과 기능으로 자리하였다. 자동차의 등장은 도시민의 이동성을 향상시켰으며, 이는 도시를 수평적으로 보다 확장하도록 촉진하였다. 그러나 도시에 자동차 사용 증가로 인해 교통 정체와 환경문제가 심각해지면서 자동차 사용을 줄이기 위한 대안이 논의되기 시작하였다. 압축 혹은 분산 개발에 대한 논의가 바로 그것이다. 이를 위해 수평적인 관점에서 스프롤을 개념적으로 정의하고 측정 방법과 영향을 탐색했으며(Pendall 1999; Hamidi et al., 2015), 스프롤과 압축도시를 비교하고 압축 도시에서 발견되는 효용에 관하여 논의하였다(Ewing and Hamidi, 2015; Naess, 2005). 특히, 토지이용과 통행의 관계에 대하여 풍부한 논의가 이루어졌다(Ewing and Cervero, 2010; Gim, 2012; 2013).

도시의 평면적 기능 향상의 결과는 도시 환경의 악화로 이어졌다. 도시 정주 인구, 건물 및 자동차가 증가하면서 도시에서 인위적으로 생성되는 물질과 에너지 흐름이 비정상적으로 나타난 결과였다(Oke et al., 2017). 도시화로 인한 개발면적이 확대하면서 나타난 토지이용의 변화가 도시 온도 증가의 주요한 원인으로 지목되었다(Kalnay and Cai, 2003). 농촌 지역과

부터 1/n만큼의 통제를 받고 있음을 의미한다(이범동 외, 2020). 명료도는 공간 구조의 전체 속성에 따른 전체통합도와 국부적인 특성을 따른 국부통합도와의 상호관련성을 의미하며, 상호관련성이 크면 명료도가 크다(김영욱, 2003)

비교하여 도시화 지역에서 나타나는 비정상적인 온도 증가를 지칭하는 열섬 효과는 도시화로 인해 21세기 인류가 직면한 주요한 문제로 꼽힌다(Memon et al., 2008). 많은 연구가 녹지 감소와 같은 토지이용변화(Stone et al., 2010), 도시 크기(Oke, 1973), 건물 밀도(Gabriel and Endicher, 2011)와 같은 평면적 속성에 기대어 온도 증가의 영향을 보고한다. 그러나 평면적 속성만으로는 높이와 체적의 함수인 공간에서 나타나는 열 에너지 저장과 이동 흐름의 복잡성을 이해하기에 충분하지 않다.

한편 수직 도시형태에 대한 초기관심은 1991년 스피로 코스토프(Spiro Kostof)의 The city shaped에서 발견된다. 코스토프는 도시형태가 나타나게 된 사회, 역사 및 지리적 배경에 집중하면서 다섯 가지 형태의 도시 형태를 제안하였다<sup>3</sup>. 수직 도시형태는 코스토프의 다섯 가지 주요한 형태 중 하나로 거론되었는데, 도시 건물이 만드는 스카이라인에 주목한다. 스카이라인은 모더니즘 이후 등장한 마천루에 의해 만들어진 새로운 도시형태로, 코스토프는 스카이라인을 구성하는 디자인 원칙을 높이, 모양, 그리고 접근(height, shape, and approach) 세가지로 제안하였다.

높이는 더 높이 짓기 위한 경쟁적인 열망을 표현한다. 건물의 높이는 대부분의 도시에서 법적으로 제한되었는데, 이에 호놀룰루의 단조로운 스카이라인과 같이 바닷가를 따라 몇 마일씩 이어지는 획일적인 모습이 탄생하였다. 모양은 랜드마크와 같이 도시의 독창적인 표지의 역할을 한다. 코스토프에 의하면 랜드마크는 높이만의 함수가 아니다. 그는 높이는 낮지만 발전소와 같이 부피가 큰 건물이 지역의 이미지를 좌우하는 사례를 들며 부피의 중요성을 강조하였다. 그리고 스카이라인을 기능적으로 바라본 원칙인 접근은 도시 경관을 감상하는 수단이 되거나 이정표 혹은 출입문의 역할을 의미한다.

도시의 스카이라인은 도시가 추구하는 가치의 변화를 의미한다. 도시를 상징하는 고층건물의 독특한 가치가 경제적 유익을 도모하기 위한 더 높고 밀집된 건물이 주는 가치에 밀려났다. 일부 산업화 이전의 도시 형태로 돌아가자는 호소가 남아있긴 하지만 고층 도시는 이제 전통이 될 만큼의

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> 스피로 코스토프가 제안한 도시의 다섯 가지 형태는 다음과 같다: 오가닉 패턴 (Organic patterns), 그리드(The grid), 다이아그램(The city as diagram), 그랜드 매너(The grand manner), 도시 스카이라인(The urban skyline)

시간이 지났다고 평가한다. 여기에서 끝나지 않고 코스토프는 고층 도시에 대한 새로운 질문을 던진다. 과연 고층 건물이 시민들의 삶의 질을 향상시키고 있는가? 경쟁적으로 지어지는 도시의 고층 건물이 보행자의 실제 세계를 고려하고 있지 못하므로 도시의 미기후와 같은 환경적 영향에 대한 질문이 뒤따라야 한다고 지적하였다.

도시는 물리적인 구조가 수직 도시형태로 변화하면서 수평으로 확장하던 도시의 기능이 수직으로 쌓여가기 시작하였다. 수직 도시형태의 탄생은 도시가 내포하는 가치의 변화로 이어졌다. 수직 도시형태에 대한 초기연구는 도시가 추구하는 가치, 즉 정치, 사회, 문화 및 경제적 변화의 흐름을 주로 논의하였다. 수직 도시형태는 전통적으로 종교성을 띤 건물의 의미가 이어져 인간의 영적이고 우주적인 야망이 계승되었거나 시카고와 뉴욕을 통해 보여주는 자본주의의 확대를 의미하는 것으로 보았다(Harris, 2014). 정치적으로는 권위의 상징으로써 세계무역센터 테러를 통해 고층 건물이 내포하는 권위의 파괴가 상징적으로 나타나는 것으로 보기도 하였다(McNeill, 2005).

최근 들어 수직 도시형태의 물리적 형태에 대한 관심도 증가하고 있다. 물리적 형태는 수직 도시형태에서 한 걸음 더 나아가 수평과 수직 차원의 상호작용으로써 압축 및 공간 기능을 포함하는 입체적인 도시형태에 대한 관심을 포함한다(McNeill, 2019). 홍콩의 *Cities without Ground: A Hong Kong Guidebook*(Frampton et al., 2012)는 도시 공간을 전통적인 도형과 지면(figure-ground)이 아닌 입체적 도시형태로써 3차원 순환 네트워크 매핑을 시도한 기준점이 되는 사례이다(McNeill, 2020). 이 연구는 물리적인 접근에 그치지 않고 공간을 채운 건물과 비어 있는 공간의 상호작용을 연결하는 데까지 나아간다. 도시형태에 대한 3차원 접근은 온도, 습도, 소음 및 냄새와 같은 미기후의 분포를 통해 공간에 대한 이해를 돕는다 (Frampton et al., 2012).

수직 도시화(Vertical urbanism)는 도시설계요소의 분포 패턴과 상호관계를 새로운 방식으로 바꾸었다. 홍콩, 상하이, 도쿄, 서울, 뉴욕과 같은 메가시티는 용적률(the floor area)과 필지(plot ratios) 비율이 1:12 이상이고 주거 밀도는 에이커당 400명을 초과하는 것으로 나타나며, 이는 도시계획의 초점이 더 이상 평면이 아닌 지면과 수직으로 연결되어 확장된

영역을 포함해야 함을 의미한다(Lin, 2018). 예컨대, 수직적으로 혼합된 기능을 현재의 평면적인 기능의 혼합으로 측정 및 매핑하기는 어렵고, 면적 및 직경 또는 둘레와 같은 평면적 속성에 의존하던 압축성도 도시의 기하학적 의미를 평가하기 위한 새로운 차원의 개념화가 필요하다. Bruyns et al. (2021)은 체적 도시주의(Volumetric urbanism)를 도시형태의 새로운 동인으로 제안하며 밀도, 기능적 혼합, 압축성, 네트워크 복잡성, 상호작용강도, 시간 및 활력에 수직적인 의미를 부여하여 도시형태를 입체적으로 새롭게 개념화하였다.



[그림 2-3] 수평 및 수직 도시형태 속성을 반영한 네트워크 복잡성(Bruyns, 2021)

도시화의 결과로써 나타나는 환경문제도 도시의 수직 메커니즘에 의해 더 잘 설명된다. 도시의 수직형태가 만드는 도시 경계층과 공기역학적인 에너지 흐름이 변화시킨 대기 온도와 오염물질의 증가는 오래된 논의의 주제이다(Oke, 2002). 도시를 구성하는 주요한 요소인 건물의 높이와 공간 밀도는 그늘 효과(Shih et al., 2017; Zhang et al., 2020), 열 용량(Li et al., 2020; Oke et al., 2017), 환기 성능(Buccolieri et al., 2010; Cheng et al., 2012)에 영향을 미쳐 열 저장, 이동, 현열 및 잠열과 같은 도시 에너지 흐름에 변화를 만들었다. 그러나 도시의 형태와 비균등적인 특성은 복잡한 상호관계를 통해 도시 기후에 영향을 미치고 있다(B. Zhou et al., 2017). 여전히 수직 도시형태에 관한 부족한 개념화는 도시 온도에 대한 이해를 어렵게 한다.

수직 및 입체적 도시형태를 향한 이론적인 토대와 형태학적 논의가

뒤따르고 있지만 Elden(2013)이 지적한 바와 같이 여전히 지리학의 공간은 높이와 깊이 측면이 아닌 수평적인 영역의 측면에서 받아들여진다. 도시를 2차원적인 면적(area)으로 보는 실증주의적 매핑(mapping)이 도시 지리학에 상당히 뿌리 깊게 남아 있다(McNeill, 2020). 더불어 수직적 도시주의는 정적인 의미에서 단지 고층건물의 수를 늘리기 위한 전략이 아닌 도시를 다층적이고 다차원적인 유기체로 다루기 위해 물리적으로 상호작용하고 사회적인 참여를 독려하는 방식이다(Lin, 2018). 수직 도시형태를 통한 형태학적 접근은 도시 기후에서 나타나는 복잡한 물리적인 상호작용을 이해하는 중요한 걸음이 될 것이다.

#### 제 2 절 도시 기후

도시화는 도시 기후(urban climate)를 새롭게 정의했다. 도시가 존재하기 위해서는 도시가 만들어내는 물질과 에너지의 흐름이 마치 살아있는 유기체의 신진대사와 유사하게 도시 경계 내외부로 이동하며 평형을 만들어 유지되어야 한다(Oke et al., 2017). 그러나 도시의 건조 환경(built environment)이 그 흐름에 변화를 만들어 입력과 출력 간의 불평형을 유발했다. 건조 환경은 도시로 들어온 태양 복사열을 비정상적으로 저장하고 방출해 도시의 열에너지를 증가시켰으며(Taha, 2004), 사람들이 생활하고 이동하면서 배출하는 대기오염물질을 증가시키고(Easa and Samdahl, 1998), 물질의 순환을 막아 대기오염으로 인한 부정적인 영향을 심화하였다(Yuan et al., 2017). 또한, 도시가 끊임없이 확장하면서 녹지가 감소하고, 물과 토양이 오염되어 도시 기후를 악화시켰다.



[그림 2-4] 도시 에코시스템의 입력 및 출력 요인(Oke et al., 2017)

도시화로 인해 집약된 인간 활동은 자연계(natural system) 작동에 심각한 간섭을 일으켰다(Oke, 2002). 도시화로 인한 인간 활동과 도시 형태가 상호작용하여 해당 지역의 공기 역학적 특성과 열에너지 흐름을 변화시켰다(Erell et al., 2012). 이로 인해 수정된 지역의 온도와 기류 분포가 열섬 효과와 같은 부정적인 결과를 낳았다. 도시의 인구와 규모(Ramírez-Aguilar & Souza 2019), 건물 밀도(Memon et al., 2008), 피복재질(Arnfield, 2003), 높이(Oke, 1988)와 같은 도시 형태가 도시 기후와 상호작용하며 변화를 일으킨 것이다.

Luke Howard(1833)는 "Climate of London"을 출판하면서 도시 형태가 지역 기후에 미치는 영향을 처음으로 발표하였다. 이 연구는 런던 내의 한 지점(Royal Society)과 런던 인근의 세 지역(Plaistow, Tottenham, and Stanford)에서 수집한 온도 기록을 비교하여 보다 도시화되었던 런던의 온도가 주변 도시의 온도에 비해 항상 더 높다는 것을 발견하였다(Mills, 2008). 열섬 효과로 불리우는 잘 알려진 현상이다. 이러한 도시 기후의 독특한 특징을 나타내는 열섬 효과는 Sundborg(1951)에 의해 구체화되었다. Sundborg(1951)은 도시에 조성된 건물과 도로가 태양 복사를 흡수하고, 대기의 대류, 복사, 증발과 같은 작용을 통해 물리적으로 균형을 이루는 과정을 설명하였다. 이후 Lowry (1977)는 배경 기후(background climate), 즉 로컬 기후의 효과와 로컬 도시화의 효과를 구분함으로써 도시화가 주변 지역의 기후에 미치는 영향인 '도시 효과'를 보다 체계화하였다(Mills, 2008).

도시는 인위적으로 열을 방출함으로써 도시 기후에 영향을 미친다. 도시에서 발생하는 인위적인 열 에너지 방출은 건물의 에너지 사용과 같은 정적 열원과 자동차 배기열 방출 등의 동적 열원으로 구분될 수 있다(Memon et al., 2008). 거주지, 상업지, 공업지에서 발생하는 전기기기 사용 열 에너지, 여름에 더울수록 에어컨을 더 많이 사용해서 냉방 부하가 증가하고, 겨울에는 난방 기기 사용이 증가해 난방 부하가 증가한다. 이를 통한 에너지 방출은 주변 지역의 온도에 중요한 영향을 미치고, 도심의 열섬 강도를 높이는 역할을 한다(Santamouris, 2001).

자동차 등의 통행 수단이 내뿜는 열 에너지도 도심의 온도를 상승시키므로 도로가 많은 지역에서 대기 온도가 높게 나타날 것이다. 인도 Chennai T. Nagar을 대상으로 열 환경을 조사한 연구는 버스터미널에서 배출하는 인위적인 열 때문에 천공비가 낮은 공간에서 온도가 가장 높음을 발견하였다(Horrison and Amirtham, 2016). 이는 환기 성능의 저하 와도 관련이 있다. 건물이 밀집한 지역에서는 열 에너지가 저장되는 불투수포장 면적이 넓고, 밀집된 건물로 인해 환기 성능이 저하되어 대류 혹은 이류에 의한 냉각 효과가 떨어진다(Ng et al., 2011).

또한, 도시 효과는 도시의 토지이용과 밀도와 같은 도시의 수평적 형태에 따라 지역의 기후를 다르게 만들었다. 크게 건조 환경과 자연 환경이 미치는

영향이 다르다. 나무, 초본, 토양과 수 공간은 도시의 온도를 낮추고 대기오염 농도를 감소시키는 등 기후를 완화하는 역할을 하므로 건조된 지역과 구별되어야 하며, 더 세밀하게는 녹지와 수 공간의 영향력도 달리 나타난다. 도시화 지역을 구성하는 피복 재질도 태양 복사에 대한 단파 및 장파 복사량을 조절하고, 식물의 증산작용과 같이 대기오염 농도를 완화하는 데 영향을 미치는 중요한 역할을 한다. 도시의 피복 재질은 자연 재료인 토양, 식생, 물과 인위적인 재료인 콘크리트, 아스팔트, 돌, 목재, 금속 등을 의미한다. 특히 도시의 피복 재질은 건물 높이의 영향을 크게 받는다. 어떤 공간의 토지 이용이 동일하다고 하더라도 건물의 높이에 따라 피복 재질의 영향이 크게 달라지기 때문이다.

예컨대, 건조된 도시의 온도는 보다 자연 상태가 보존된 인접한 농촌 지역의 온도에 비해 상당히 높게 나타났다(Oke, 1995). 비슷한 기후의 크기와 규모가 같은 도시 간에도 차이가 나타났다. 녹지 손실이 많은 지역에 극심한 폭염 빈도가 나타나는 경향이 잦았다(Stone et al., 2010). 또한, 보다 광범위하게 스프롤된 지역은 압축 도시에 비해 지표면 오존 농도(Ewing et al., 2003), NOx(Lee, 2019a), PM2.5(Bereitschaft and Debbage, 2013; Lee, 2019b)를 증가시키는 경향을 보였다. 공간적으로 보다 작은 규모인 로컬 규모에서도 도시 형태에 따라 기후에 차이가 발견된다. 도시 형태가 에너지 플럭스의 저장 및 교환을 교란시키고, 녹지와 수 공간의 영향으로 인해 지역의 온도 차이를 만들었다(ARUP, 2014). 또한, 포디움 구조(podium structure)와 건물 밀도가 높은 지역에 조성된 열악한 환기 성능으로 인해 오염물질의 농도가 높게 나타났다(Kim and Gim, 2022).

도시 형태로 인한 대기의 수직 메커니즘 역시 도시 기후에 영향을 미쳤다(Oke, 2002). 대기의 수직 메커니즘에 의해 도시 대기에 형성되는 경계층은 크게 세 단계로 구분된다. 가장 큰 단위로서 도시 규모에서 형성하는 대기층을 행성경계층(Planetary boundary layer, PBL)이라고 하며, PBL은 더 작은 범위의 경계층인 도시경계층(Urban boundary layer, UBL)과 도시캐노피층(Urban canopy layer, UCL)로 구분된다. UBL은 meso-scale 개념으로 PBL의 한 파트이고 UCL을 포함하며, UCL은 micro-scale 개념으로 표면과 빌딩, 나무 사이의 로컬 기후를 의미한다. 대기의 수직 메커니즘 관점에서 UBL은 낮 동안 더 높은 고도 열 역전이 우세한(the higher altitude thermal inversion dominant) 반면, UCL은 야간 동안 더 낮은 고도 역전이 우세한(the lower altitude inversion dominant) microscale 프로세스에 지배되는 특성을 보인다. 도시의 형태는 UBL과 UCL의 고도 역전 현상을 통해 에너지 플럭스에 영향을 미쳤다. 지역 규모의 기후는 UCL에 의존하는데 이는 공기가 지형과 건물 배치 특성에 따라 정체되거나 유동하며 국지 기후(local climate) 환경을 조성하기 때문이다.



[그림 2-5] 표면 거칠기에 의해 형성된 도시의 경계층 구조(Gunawardena et al., 2017)

물리적인 도시 형태에 따라 형성되는 수직 메커니즘은 도시 구조의 스카이라인에 영향을 받는다. 도시 구조는 지표면 위의 인위적인 구조물로 건물의 높이, 면적, 배치, 도로를 포함한 오픈 스페이스의 폭과 형태와 같은 도시 형태의 3차원적인 특성을 의미한다. 도시 구조는 도시의 공기 흐름과 대기 열 이동을 수정하여 영향을 미친다. 일부 연구는 수직 도시형태가 도시의 열 에너지 증감에 미치는 영향을 분석하였다. 도시 기후에 대한 수직 도시형태의 영향은 그늘효과, 열용량, 환기성능으로 간추릴 수 있다. 높은 건물은 그늘 효과를 만들어 단파 복사에 의한 가열을 막기도 하지만, 열 에너지 흡수 면적이 넓어지고 단·장파복사열 재 반사에 의한 복사열이 증가하며, 환기 성능에 영향을 미쳐 도시 온도를 증가시킨다. 대체로 그늘 효과에 의한 냉각효과가 환기 성능 저하에 의한 온도 증가를 능가하는 것으로 나타난다(Cheung and Jim, 2018). 그러나 고층 건물에 의해 재 반사된 단파 복사량이 줄어든 장파 복사량을 능가하여 온도를 증가시키기도 한다(Chatzidimitriou and Yannas, 2015).

로컬 기후 존(Local climate zones, LCZ)은 도시 형태에 따라 나타나는 로컬 기후를 체계적으로 정리하는데 기여하였다. Stewart and Oke(2012)는 LCZs를 총 17개 형태로 구분하면서 도시 형태를 속성 값으로 제시하였다. 도시 형태는 high-, mid-, low-rise 타입의 수직 도시형태와 밀도(compact or open)를 중심으로 각각 구분되어 10개의 Built types와 7개의 Land cover types으로 나뉜다.

(a)				(b)								
Built types	Definition	Land cover types	Definition	Local climate zone	Sky view	Aspect ratio <sup>b</sup>	Building surface fraction <sup>s</sup>	Impervious surface fraction <sup>d</sup>	Pervious surface fraction*	Height of roughness elements	Terrain roughness class!	
da a da.	stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	debåbåt bast	Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.	LCZ I	0.2-0.4	> 2	40-60	40-60	< 10	> 25	8	
156.6		AN ALL ALL ALL		Compact high-rise								
PROP				LCZ 2	0.3-0.6	0.75-2	4070	30-50	< 20	10-25	6-7	
2. Compact midrise	Dense mix of midrise buildings (3-9	B. Scattered trees	8. Scattered trees	Lightly wooded landscape of	Compact midrise							
4440-4	stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.		deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.	LCZ 3	0.2-0.6	0.75-1.5	4070	20-50	< 30	3-10	6	
FLS		11214 11		Compact law-rise								
and the second second		14 4 11 11		LCZ 4	0.5-0.7	0.75-1.25	20-40	30-40	30-40	>25	7-8	
3. Compact low-rise	Dense mix of low-rise buildings (1-3	C. Bush, scrub	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or	Open high-rise								
,0000000000	stories). Few or no trees. Land cover	11111		LCZ 5	0.5-0.8	0.3-0.75	20-40	30-50	20-40	10-25	5-6	
1999999	concrete construction materials.	5		Open midrise								
menered		1.2 1.6 1.1	agriculture.	LCZ 6	0.6-0.9	0.3-0.75	20-40	20-50	30-60	3-10	5-6	
4. Open high-rise	Open arrangement of tall buildings to	D. Low plants	Featureless landscape of grass or	Open low-rise								
all all all	tens of stories. Abundance of pervious		herbaceous plants/crops. Few or	LCZ 7	0.2-0.5	1-2	6090	< 20	<30	2-4	4-5	
1,51,51,7	trees). Concrete, steel, stone, and	100	grassland, agriculture, or urban park.	Lightweight low-rise								
O ALA O	glass construction materials.			LCZ 8	>0.7	0.1-0.3	30-50	40-50	<20	3-10	5	
5. Open midrise	Open arrangement of midrise buildings	arrangement of midrise buildings E. Bare rock or paved scories). Abundance of pervious over (low plants, scattered ). Concrete, steel, stone, and construction materials.	Featureless landscape of rock or	Large low-rise								
2000	(3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.		pawed cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.	LCZ 9	> 0.8	0.1-0.25	10-20	< 20	60-80	3-10	5-6	
A STAT				Sparsely built								
and the second				LCZ 10	0.6-0.9	0.2-0.5	20-30	20-40	4050	5-15	5-6	
6. Open low-rise	Open arrangement of low-rise buildings	F. Bare soil or sand	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.	Heavy industry								
	(I-3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	RET		LCZ A	< 0.4	>1	<10	<10	>90	3-30	8	
and the state				Dense trees								
2020200				LCZ B	0.5-0.8	0.25-0.75	<10	<10	>90	3-15	5-6	
	D	C 101		Scattered trees								
7. Ligntweight low-rise	Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	G. Water	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.	LCZ C	0.7-0.9	0.25-1.0	<10	<10	>90	<2	4-5	
A CONTRACTOR				Bush, scrub								
AND SHOP				LCZ D	>0.9	< 0.1	<10	<10	>90	<1	3-4	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Open annument of land loss size	VARIABLE LAND COV	CD PRODERTIES	Low plants								
8. Large low-rise	Open arrangement or urge low-rise building: (1-3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction matarials.	Variable or ephemeral land o significantly with synoptic w and/or seasonal cycles.	f cover properties that change weather patterns, agricultural practices,	LCZ E	>0.9	< 0.1	<10	>90	<10	< 0.25	1-2	
1				Bare rock or paved								
1-1				LCZ F	>0.9	< 0.1	<10	<10	>90	< 0.25	1-2	
				Bare soil or sand								
9. Sparsely built	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural	b. bare trees	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor, Reduced	LCZ G	>0.9	< 0.1	<10	<10	>90	-	1	
A & 3 & 3	setting. Abundance of pervious land		albedo.	Water								
0 8 - 8 E	cover (low plants, scattered trees).	s. snow cover	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.	* Ratio of the amount of sl	ky hemisphere v	visible from gro	und level to that	t of an unobstructe	ed hemisphere			
				<sup>b</sup> Mean height-to-width ra	itio of street car	iyons (LCZs 1-	7), building spac	ting (LCZs 8–10), a	ind tree spacin	g (LCZs AG)		
10. Heavy industry	Low-rise and midrise industrial struc- tures (towers, tanks, stacks). Few or	d, dry ground w. wet ground	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo. Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.	"Ratio of building plan area to total plan area (%)								
the star as	no trees. Land cover mostly paved			<sup>4</sup> Ratio of impervious plan area (paved, rock) to total plan area (%)								
495	or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.			° Ratio of pervious plan ar	rea (bare soil, ve	getation, water	r) to total plan a	irea (%)				
				<sup>1</sup> Geometric average of bu	uilding heights (L	CZs I-10) and	tree/plant heigh	hts (LCZs A–F) (m	)			

[그림 2-6] 로컬기후존(Local climate zones) 분류. (a) 로컬기후존 정의; (b) 로컬기후존에 대한 기하학적 특성값

LCZs는 도시 기후와 수직 및 수평 도시형태를 이해하는 데 상당한

도움이 되었으나 몇 가지 한계가 존재한다. 저자가 연구에 명시한 것과 같이 현실의 도시 형태는 연구에서 제안한 17개의 LCZs가 단일 도시 형태로 제시될 가능성이 거의 없다. 이에 저자는 두 가지 이상의 LCZs가 결합된 서브클래스로 구분이 가능하도록 제시하였다. 예컨대, LCZ 4(Open highrise)와 LCZ 3(Compact low-rise)가 결합되어 LCZ34 서브클래스로 구분하는 방식이다. 이를 통해 다양한 수준의 도시 형태를 조합할 수 있지만 LCZs의 목적이 도시 형태에 따른 열섬 효과를 간단한 방식으로 체계화하기 위한 것이므로 복잡한 형태의 도시 형태는 본래의 목적에는 맞지 않는다. 또한, 수직 도시형태에 대한 분류가 아직 체계적지 못하여 건물의 높이, 체적과 구조를 유연하게 반영하기 어렵다.

LCZs를 몇 가지 중요한 지표로 간소화한 Yang and Chen(2020)의 연구도 주목할 만하다. 저자는 상하이의 도시 형태에 맞추어 LCZs의 서브클래스를 제안하였다. 로컬 규모에서 밀도(Density), 연면적(Floor area ratio), 녹지면적, 토지이용, 지형(Typology) 변수를 중심으로 정리하였다. 예컨대, LCZ1 기준은 다음과 같다: 1) 밀도: 매우 높음(very high), 2) 연면적: 높음~매우 높음(high to very high), 3) 토지이용: 상업 및 비즈니스, 주거-상업 혼합, 4) 지형: 초고층 주거 타워, 초고층 오피스

이 연구는 높이를 보다 다양한 위계로 구분하여 수직 형태에 대한 직관적인 이해를 도왔다. 다만, 로컬 규모에서 나타나는 도시 형태의 다양성을 고려하면 이 연구의 구분처럼 특정 몇 가지 유형으로 압축하기 어려운 측면이 있다. 다른 지역의 도시 형태를 평가하는 것이 가능하도록 도시 형태를 보다 표준화된 방법으로 구분할 필요가 있다. 또한, 최근 관심이 증가하고 있는 물리적인 도시 형태의 체적 특성을 반영하지 못하였다.

# 제 3 절 에너지 이동 및 균형(Energy transfer and balance)

도시 기후와 에너지 흐름과의 관계는 열역학 제1법칙(The First Law of Thermodynamics), 즉 에너지 보존의 법칙으로 설명될 수 있다. 열역학 제1법칙은 시스템의 내부 에너지(U)는 시스템에 가해진 열(Q)에서 시스템이 한 일(W)를 뺀 것과 같으며, 시스템 안에서 에너지는 생성되거나 소멸될 수 없다고 설명한다. 이는 입력된 에너지와 출력된 에너지가 형태는 다를 수 있지만 그 양이 동일하다는 것을 의미한다([그림 2-7]).



 $U_{input} = U_{output}$ 

[그림 2-7] 시스템의 내부 에너지 흐름

도시 형태는 도시 내부에서 대기의 열역학 및 동적 상태를 수정하였다. 미시적인 규모에서 도시의 미기후는 전통적으로 대기의 열역학 및 동적 상태. 즉 복사, 온도, 습도, 풍속 및 압력 등의 변수로 특성화 된다(Rotach and Calanca, 2002). 이러한 동적 상태가 도시 형태에 반응하여 에너지 평형을 맞춘다. 지구로 들어온 태양 에너지가 도시 내에서 발생하는 복사열과 인간 활동에 의해 도시 표면 시스템(urban surface system)으로 흡수되어 저장하거나 대류, 복사, 증발 작용으로 지상의 공기를 데우며 물리적 균형을 이룬다(Oke, 1988). 구체적으로 살펴보면, 태양복사열(Q\*)과 인가의 인위적인 활동에 의해 생성되는 열(QF)이 도시 시스템 내부에 에너지를 입력한다. 시스템에 들어온 에너지는 표면과 대기 사이에서 현열속 밀도(the sensible heat flux density, Q<sub>H</sub>)와 잠열속 밀도(the latent heat flux density, Q<sub>E</sub>) 및 표면에 저장된 상태(Q<sub>G</sub>)로 균형을 이룬다. Q<sub>G</sub>의 경우 지표면 외 아무런 장애물이 없는 빈 공간(open space)에서는 지표면 온도로 단순화되지만 실제 도시 시스템 내에서는 건물, 도로와 같은 도시 형태 요소에 의해 복잡한 열 교환이 발생하게 된다.

도시 형태에 의한 교란은 구성 요소의 피복재질(materiality)에 의한 에너지 저장(△Q<sub>s</sub>)과 구조와 배열에 의해 발생한 이류(advection) 변화 (△Q<sub>A</sub>)로 구분될 수 있다. 그러나 단순히 각 구성요소가 대기와 반응하여 구성된 에너지 균형의 합으로 생각할 수 없고, 각 요소의 상호작용을 고려해야 한다. 도시 시스템 내부의 열 에너지는 도시 형태와 같은 표면 속성에 따라 반사되어 시스템 밖으로 방출되거나 시스템 내부에 저장된다(△Q<sub>s</sub>). 에너지의 저장은 표면 재질이 가지는 저장 능력에 따라 차이가 발생하는데, 오히려 녹지는 광합성 작용을 통해 복사열을 흡수하여 저감하기도 한다(Dang et al., 1997). 시스템을 통과하는 바람의 전도 및 대류에 의한 열 에너지 변화는(△Q<sub>A</sub>) 도시 내 도시 형태가 만들어 내는 바람 환경(air condition)에 영향을 받는다. 도시 형태에 의해 공기 순환이 저하되면서 풍속이 줄어들어 대류에 의한 열 에너지 방출을 방해한다.



[그림 2-8] 도시 내 에너지 이동 및 균형(modified based on Oke et al., 2017)

위의 논의에 따른 에너지 이동 및 균형식(energy transfer and balance equation)은 다음과 같다(Oke et al., 2017):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \triangle Q_S + \triangle Q_A$$

Q\*: 순 전 파장 복사(the net allwave radiation)

- Q<sub>F</sub>: 인간 활동에 의해 생성된 인위적인 열(heat released inside the volume due to human activities)
- Q<sub>H</sub>: 현열속; 표면과 대기 사이의 온도(the sensible heat flux density; temperature between the surface and atmosphere)
- Q<sub>E</sub>: 잠열속; 증발에 의한 열(the latent heat flux density; the consequence of transporting water vapour)
- △Qs: 도시의 모든 표면의 저장 열(the net heat storage change by all the fabric of the city)
- △Q<sub>A</sub>: 바람 이송에 의해 추가된 열(the net energy added to, or subtracted from, the volume by windborne transport)

도시 시스템의 에너지 균형식은 에너지 보존 법칙에 따라 Q\* 혹은 Q<sub>F</sub>의 증가에 의해 Q<sub>H</sub>, Q<sub>E</sub>, △Q<sub>S</sub>와 △Q<sub>A</sub>가 변화함을 의미한다. Q\*가 증가하면 낮 시간 동안 단파 복사가 직접적으로 대기를 데워 대기 온도의 상승을 불러온다. Q<sub>F</sub>의 증가는 도시에서 발생하는 인위적인 활동의 증가로 이해할 수 있다. 예컨대, 공장이나 건물의 냉방 혹은 난방 부하가 증가하거나 자동차와 같은 통행 수단이 많을 수록 배출 열이 증가한다. Q\*와 Q<sub>F</sub>의 증가는 시스템 내부 열량의 절대량을 증가시켜 도시 시스템 내부 에너지의 상승을 이끈다.

한편 Q\*와 Q<sub>F</sub>가 일정한 경우 Q<sub>H</sub>, Q<sub>E</sub>, ΔQ<sub>s</sub>, 혹은 ΔQ<sub>A</sub>의 변화는 도시 시스템의 도시 형태 구조(structure), 표면(cover), 그리고 재질(fabric)과 관련이 있다. Q<sub>H</sub>는 표면온도와 대기온도의 차이로 대류에 의해 일어나는 열 교환을 의미하고 Q<sub>E</sub>는 물이 수증기가 될 때의 상태 변화에 사용되는 열을 의미한다. 이 두 지표를 난류 열 유속(turbulent heat flux densities)이라고 부르며 보웬 비율(Bowen ratio, β)을 통해 대기 온도 변화를 유추할 수 있다. 보웬 비율은 현열속/잠열속으로 계산된 값이다. β>1이면 지표면이나 시스템이 더 많은 열을 감지 가능한 형태로 전달하여 지표면 부근의 대기를 데우고, β<1이면 잠열이 많은 열을 가지고 있어 지표면 부근의 대기 온도를 차갑게 유지한다. 예컨대, 녹지를 통해 잠열을 증가시키고 현열을 감소시키는 것이 가능하다(Krayenhoff et al., 2014).

△Qs은 시스템 내부에 에너지 저장량의 변화를 의미하며, 도시 시스템 내의 인공구조물의 구조와 재질에 영향을 받는다. △Qs의 변화는 증가와 감소 어느 한 방향으로 설명할 수 없고 복잡한 특성을 보인다. 인공 구조물의 재질은 태양의 단파 및 장파 복사로 인해 도시의 UHI를 심화한다. 낮 시간 동안 단파복사는 직접적으로 대기를 데우고, 장파복사는 회색 인프라(Gray infrastructure)에 흡수된다. 밤 시간에는 태양복사가 직접적으로 대기를 데우지 못하지만 낮 시간 동안 회색 인프라에 흡수된 장파 복사가 방출되어 야간에 열섬 효과를 만들어 내는데, 현상은 주로 여름에 관찰된다(Memon et al., 2008; Oke, 2002; Taha, 2004). 고층 건물(High-rise building)이 있는 지역은 평평한 지역보다 열 흡수 면적이 증가하지만(Gridharan, 2005), 건물이 낮 시간 동안에는 그늘 효과(shading effect)를 만들어 태양의 단파 복사로 인한 온도 상승을 막고, 도로에서 장파 복사를 흡수하지 않아 야간에도 열을 덜 방출하는 경향을 보인다(Zhang et al., 2020).

△Q<sub>A</sub>의 저하는 시스템 내의 대기 온도를 상승시킬 가능성이 있다. 협소한 지역은 건물의 방해로 개방된 지역에 비해 풍속이 낮아 공기 순환이 저하된다(Wang and Akbari, 2014). 일반적으로 대류에 의한 냉각 효과가 증발산 효과보다 큰 것으로 알려져 있으므로(Zhao et al., 2014), 공기 순환이 저하되어 형성된 열악한 바람 환경은 도시의 대기 온도를 상승시켜 열섬 효과를 만든다. 이에 건물의 배열, 구조, 크기, 위치 등을 조절하여 바람길을 형성함으로써 도시의 열섬과 대기오염 농도를 완화할 수 있다(Ng et al., 2011).
### 제 4 절 도시형태의 온도 조절

도시 시스템 내에서 도시 형태와 에너지 변화의 관계는 복잡한 양상을 보인다. 이에 제3절에서 도시 형태가 도시의 열 조절에 미치는 영향에 관하여 열 저장, 열 이동, 그리고 현열속 및 잠열속 변화를 중심으로 보다 자세히 고찰하였다.

#### 1. 열 저장(Heat storage)

피복 재질의 종류는 도시의 열 교환을 수정한다. 태양이 발산하는 단파복사열(shortwave radiation)이 대기와 표면에 도달하면서 온도를 만들고, 온도는 다시 장파복사열(longwave radiation)의 형태로 대기 중으로 발산한다(Grimmond, 1992). 단파복사열과 장파복사열은 흡수(absorption), 투과(transmission), 반사(reflection) 작용을 통해 열 교환을 하며 에너지 균형을 이룬다(Krayenhoff et al., 2014). 대기와 표면에 직접 온도를 전달하는 단파복사열은 표면의 반사율에 따라 온도에 미치는 영향이 달라진다. 알베도가 높은 재질을 사용하면 태양복사를 반사함으로써 표면에 흡수되는 열의 양이 줄어들어 표면 온도를 낮춘다(Chatzidimitriou and Yannas, 2015). 캘리포니아 새크라멘토를 대상으로 수행한 연구는 주택 표면과 주택 주변의 반사율(albedo)을 0.25에서 0.9와 0.4로 증가시키면 온도를 낮춰 최대 62.1%까지 에너지를 절약할 수 있다고 보고한다(Taha et 아스팔트(albedo 0.05~0.12)에서 도로의 포장재도 al.. 1988). 콘크리트(albedo 0.35)로 변경하면 여름철 오후 3시에 표면온도가 약 12도~16도 낮아지는 것으로 나타난다(Akbari et al., 2001).

표면 피복에 저장된 열은 장파복사열의 형태로 도시 온도에 영향을 미친다. 도시 표면에 흡수된 태양복사열이 증가하면서 도시 열섬 효과 증가에 상당한 기여를 하였다(Santamouris, 2013). 특히, 고층 건물은 열 흡수 면적이 커 도시의 온도 증가에 크게 영향을 미친다(Gridharan, 2005; Santamouris, 2001). 또한, 밀집하여 들어선 고층 건물은 또 다른 장파 복사 효과를 생성한다. 고층 건물 밀도가 높은 지역은 단파복사열이 우주로 반사되는 것을 방해하고, 불투수 재질로 이루어진 건물과 도로 표면이 많은 양의 장파복사열을 흡수하고 발산하여 도시의 온도를 높인다. 단파 복사가 없는 야간에도 건물과 도로 표면에서 방출되는 장파복사열로 인해 도시의 온도가 상승해 열섬 효과를 만들어 낸다(Memon et al., 2008).

표면에 의해 반사된 단파복사열은 오히려 도시 온도를 증가시키기도 한다. 지표면 위 구조물의 방해로 지구 밖으로 방출되지 않고 머물러 대기 온도를 상승시키기 때문이다. 알베도가 높은 표면이 알베도가 낮은 표면에 비해 표면의 온도는 더 낮았지만 표면 위 공기 중 온도는 더 높게 나타났다(Chatzidimitriou and Yannas, 2015). 반사된 복사열로 인해 높아진 온도는 도시민의 열 쾌적성에 부정적인 영향을 미치는 것으로 보고된다(Taleghani and Berardi, 2018). 고층 건물이 밀집한 지역은 표면에서 반사된 단파복사가 하늘로 방출되지 못하도록 방해하여 밀도가 낮은 지역에 비해 내부 온도가 높아질 가능성이 크다.

한편, 도시 기후를 완화하는 도시 형태의 긍정적인 측면도 보고된다. 고층 건물 밀집 지역에서 생성되는 그늘효과(shading effect)는 도시의 내부 온도를 완화한다. 건물이 들어서면서 만드는 그늘은 낮 동안 태양의 단파 복사로 인한 온도 상승을 막고, 장파 복사를 흡수하지 않아 야간에도 열을 덜 방출한다. Zhang et al. (2020)은 중국 Harbin에서 측정한 대기온도를 바탕으로 도시 형태에 따른 대기 온도의 변화를 시뮬레이션 하였다. 연구에 따르면 여름철에는 도시의 건물이 10m 높아질수록 거리의 최대 온도가 0.06도씨 낮아졌으며, 겨울철에는 오히려 건물 층수 2~20층에서 층수가 높아질수록 평균 온도와 최소온도가 크게 증가하였다. 다만, 20층 이상에서는 변화가 미미하였다. 브라질 북동부 해안가 도시를 연구한 Silva et al. (2018)도 빌딩이 높으면 차광 효과가 증가되어 낮에는 열 쾌적성이 더 나은 환경을 조성한다고 보고한다. 그러나 밤에는 바닷바람이 도심 안으로 들어오지 못하도록 차단하여 더 강한 열섬을 생성할 수 있음을 우려한다.

건물이 밀집하여 개방성이 낮은 도시(e.g., 낮은 sky-view factor(SVF), 높은 종횡비(height-to-width, H/W))는 도시의 표면이 태양 복사에 덜 노출되어 오히려 열적 쾌적성이 높게 나타났다(Lai et al., 2019). SVF는 협곡(canyon)의 바닥에서 바라본 하늘의 비율로 해당 지역에 입사되는 태양복사의 양을 측정하는 지표를 의미한다(Oke, 1988). SVF가 낮을수록 지표면 위 장애물이 태양복사의 입사를 방해하여 보다 쾌적한 열 환경이 조성됨을 보여주었다(Charalampopoulos et al., 2013; Shih et al., 2017).

종횡비는 개방된 공간에서 열 쾌적성에 크게 영향을 미치는 지표 중

하나이다(Martinelli and Matzarakis, 2017). Ryu and Baik(2012)은 H/W가 1일 때 불투수표면(the impervious surface)이 열섬 효과에 가장 크게 기여하고 있음을 확인하였고, 3D 도시 기하학이 만드는 에너지 저장, 그늘, 복사 트랩 및 환기 성능이 낮 시간에는 열섬 효과를 낮추고 밤에는 강화한다고 보고한다. 이는 그늘에 의한 음영 효과와 장파 복사의 트래핑 효과의 두 가지 복사 효과의 영향에 의한 결과이다(Theeuwes et al., 2014). 건물이 생성하는 그늘 효과에 의해 공간에 입사되는 단파 복사가 줄어들지만 건물에 의해 재 반사되는 장파복사량이 증가하여 공간의 복사량 증감에 영향을 미치게 된다. H/W가 작으면 단파 복사량이 가장 중요하고, 다중 반사가 발생하여 평평한 지형에 비해 온도가 증가한다. 장파 복사량은 온도에 영향을 미치는 두 번째로 중요한 요인이었으며, H/W가 높아질수록 상대적으로 더 중요하였다(Schrijvers et al., 2020). 이에 Qin(2015)는 H/W 1 이하에서만 반사 포장을 사용해야 한다고 제안한다.

녹지는 광합성을 위해 복사열을 흡수하고(Dang et al., 1997), 반사하여(Taleghani et al., 2014) 공간의 순복사열을 저감시킨다. 일반적으로 가시광선의 10%, 적외선의 30%만 나무를 투과하여 녹지가 조성된 지역의 복사열이 낮게 나타난다(Brown and Gillespie, 1995). 다른 토지 피복과 비교하면 온도차이가 상당하다는 것을 알 수 있다. 잔디밭의 평균 표면 온도(34.4°C)가 콘크리트(45.5°C)보다 상당히 낮으며(Chatzidimitriou and Yannas, 2015), 잔디와 맨땅의 표면 온도 차이가 20K를 초과한 연구도 발견된다(Zheng et al., 2016).

녹지에 투과되는 복사열은 녹지가 생성하는 그림자 면적에 따라 달라진다(Kong et al., 2016). 그림자 면적은 잎의 크기, 크라운 면적과 식생 캐노피의 LAI에 의해 결정된다(Santamouris, 2014). 녹지가 만드는 그늘 효과는 단파 복사가 도시 표면에 흡수되고, 장파 복사의 형태로 대기 중으로 방출되는 것을 제한하는 효과가 있다(Oke, 1988).

도시의 열섬 효과는 대기오염물질 농도와 긴밀한 관계가 있다. 대기오염물질은 단파복사를 저장하고 지표면에서 방출하는 장파복사를 재 반사하여 가둠으로써 도시 온도 증가에 영향을 미친다(Oke, 2002; Santamouris, 2001; Memon et al., 2008). Ngarambe et al. (2021)은 한국의 서울을 대상으로 UHI와 대기오염농도 간의 상관관계를 분석하였다.

분석 결과 SO2, O3 > PM10, NO2 > PM2.5, CO으로 강한 상관 관계가 나타났다. PM2.5와 PM10이 증가하면 UHI가 증가하였고, O3는 반대로 UHI 강도를 낮추는 경향을 보였다. UHI와 대기 오염 농도의 상관관계 강도에 계절적 요인이 상당한 영향을 보였다. 겨울철에는 NO2와 PM10, 가을에는 SO2, CO, PM2.5와 O3가 강한 상관관계를 나타냈다.

기상조건과 도시 형태에 의해 비정상적으로 낮아진 대기 온도가 대기 혼합층의 높이를 낮춰 지표면 부근의 대기오염 농도를 증가시키기도 한다(Fallmann et al., 2014). 이 경우 다시 지표면 부근에서 대기오염물질에 의한 단파복사 재 반사 및 장파복사열이 증가할 수 있다. 여름 동안 베를린을 대상으로 열섬 효과와 대기오염농도와의 상관계를 살펴본 결과, 열섬 효과는 입자의 난류 분산(the turbulent dispersion of particles)을 강화하여 지표 부근(near-surface)의 도시오염지수를 낮추는 효과가 있었지만, 대기 중 입자물질이 증가한 경우 방출하는 장파복사가 늘어나 표면 열섬 강도가 12% 가량 증가하였다. 모두 낮보다 밤에 효과가 더 두드러졌다(Li et al., 2018).

#### 2. 열 이동(Heat transfer)

도시의 환기 성능은 열 에너지 교환의 중요한 매개도구이다. 바람에 의한 열 이류(heat advection)를 통해 도심의 열 에너지를 이동시키거나 녹지 혹은 수 공간에서 생성하는 찬 바람을 가져와 냉각 효과를 만들어 낼 수 있다. 도시의 환기 성능은 건물과 같이 지표면 마찰을 일으키는 요소에 의존하는데, 거칠기 길이(roughness length, Z0)는 지표면 마찰을 설명하는 대표적인 변수로 알려져 있다. 거칠기 길이는 지표면 위의 기하학적 구조와 대기의 풍속, 풍향, 운동량 등의 흐름과 관련이 있어 도시 경계층 연구에 주로 사용되며(Grimmond and Oke, 1999; Gál and Unger, 2009), 열섬 효과와 대기오염물질 확산 연구에서 응용되고 있다 (Gál and Sümeghy, 2007).

도시의 환기 성능은 지표면 위 거칠기에 의존한다. 거칠기는 경계층 위를 흐르는 공기량과 경계층 아래 난류 크기에 영향을 미친다(Grimmond and Oke, 1999). 바람이 건물과 같은 장애물을 통과하여 흐를 수 없으므로 도시 캐노피를 따라 대기 흐름의 층을 형성한다. 거칠기는 이러한 도시

캐노피층(UCL)의 높이에 직접적인 영향을 받아 바람 흐름의 속도와 용량을 결정한다(Gál and Unger, 2009). 또한, 거칠기는 도시 계곡(urban valleys)에서 수직 흐름의 난류 생성을 제어한다(Oke, 1988). 바람의 방향과 건물의 높이, 구조, 밀집 정도에 따라 건물 사이에서 소용돌이(vortex), 나선형류(helical flow) 혹은 채널링(channeling) 흐름이 나타난다(Belcher, 2005). 거칠기가 높을수록 바람 환경의 간섭 강도와 마찰의 영향이 부각되므로 거칠기를 결정하는 도시 캐노피 높이의 영향을 식별하는 것은 잠재적인 환기 통로를 식별하기 위한 기회를 제공한다.

건물의 조밀한 밀도는 도시의 환기 성능을 저해한다. 도로와 건물이 조밀하게 조성되어 협소한 지역은 개방된 지역에 비해 풍속이 낮게 나타난다(Wang and Akbari, 2014). 도시의 낮아진 풍속은 도심의 열 에너지가 특정한 지역에 정체되거나 녹지와 수 공간에서 불어오는 바람에 의한 냉각 효과를 기대할 수 없게 된다. 특히, 포디움 구조(podium structure)와 같이 체적이 큰 건물은 도시 캐노피 층 상단의 바람이 보행자 높이의 바람 환경에 도움이 되도록 거리 협곡에 도달하는 것을 방해한다(Ng et al., 2011). 그로 인해 미세먼지가 정체되는 현상이 나타나기도 한다(Kim and Gim, 2022). 이에 도시내 건물 체적의 크기는 평균 풍속과 열 및 오염 물질을 소산시킬 가능성에 대한 전반적인 영향을 추정하도록 돕는다.

밀집된 건물로 인해 유발된 열악한 환기 성능은 거리 협곡 효과(Street canyon effect)의 부정적인 영향을 보여준다. 환기 성능의 저하는 지표면 높이에서 열섬 효과가 악화 (Oke, 1988)되거나 대기오염물질의 정체(Fu et al., 2017)로 이어졌다. 거리 협곡 효과로 인한 도시 기후의 부정적인 영향은 H/W에 따라 다른 효과를 보여준다. Marciotto et al. (2010)는 브라질의 São Paulo에서 정오 무렵 남북 방향의 협곡에서 나타나는 H/W에 따른 열 유속의 변화를 시뮬레이션하였다. H/W 비율이 0.5에서 10으로 증가하면 대기 온도가 감소하였는데, 현열 유속이 300 Wm-2 감소하여 오히려 순 복사열 감소량 (120 Wm-2)보다 크게 영향을 미쳤다. 반면에 자정에는 H/W 크기에 따라 다른 결과를 보였다. H/W(4에서는 온도가 증가하다가 H/W)4에서는 시원해지는 경향을 보였다.

시뮬레이션 연구는 대기 온도가 대체적으로 낮은 H/W에서는 비슷한 결과를 보이지만 H/W가 커지면 다른 결과를 보인다. Schrijvers et al.

(2020) 낮 시간 동안 협곡 내부의 공기 온도가 외부에 비해 H/W가 0.5일때는 1.5°C, 0.85일 때는 2°C 높았지만 1일 때는 따듯한 공기가 협곡 밖으로 잘 운반되어 오히려 더 낮게 시뮬레이션 되었다고 보고한다. 그러나 이 연구는 H/W가 2에서는 공기 온도가 높아졌는데, 협곡 내부 풍속이 저하되었음을 지적한다. H/W가 높은 협곡의 열 에너지 변화는 완벽히 통제하기 어려운 측면이 있다. 낮은 H/W에서는 대기 온도가 순 복사열과 대류에 의한 현열 변화에 의존하는 경향이 크다. 반면 H/W가 높아질수록 협곡 내부에서 발생하는 소용돌이(vortex), 난류(turbulent), 도시 표면을 가로지르는 이류(advection)의 영향이 커지는데, 이를 시뮬레이션에서 완벽히 통제하기 어렵다(Offerle et al., 2007; Schrijvers et al., 2020; Barlow, 2014).

고층 건물이 생성하는 난류가 공기의 수직 이동을 원활히 하여 해당 지역의 환기 성능이 증가하기도 한다(Kubota et al, 2008). 이러한 난기류는 UCL내 보행자 수준에서 환기를 향상시키는 것으로 보고된다(Oke, 1988). 또한, 고층 건물이 생성하는 코너 바람 지역(corner wind zones)과 터널효과도 환기 성능을 향상시킨다. 고층 건물의 구석에서 지나치게 풍속이 증가하거나 건물이 바람의 방향과 평행하게 배열된 경우 건물 사이의 터널 속도가 지나치게 증가하는 경우가 발생할 수 있다(Yang et al., 2020). 이에 Lau et al. (2016)은 건물의 차광 효과로 인한 그늘이 도로의 온도를 낮추는 데 효과적이지만 환기 성능을 고려하여 건물 높이와 밀도를 높이는 대신 인공 차양 장치를 설치할 것을 제안한다.

도시의 녹지는 찬 바람을 생성하여 주변 지역의 온도를 낮추는 긍정적인 역할을 한다. 도시 숲과 도시공원에서 생성된 찬 공기를 통한 냉각효과는 주변 지역으로 각각 469, 391m까지 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Jaganmohan et al., 2016). 냉각효과의 이송은 녹지의 크기와 긴밀한 관련이 있다. Aram et al. (2019)이 열섬 효과를 줄이기 위한 도시 녹지 공간의 역할에 관한 문헌 검토 연구에 따르면 10ha 이상의 면적을 가진 대형 공원의 평균 냉각 효과 거리(cooling effect distance, CED)와 냉각 효과 강도(cooling effect intensity, CEI)가 높게 나타났다. 즉 공원 경계에서 350m까지 1-2°C 감소하였다. 그러나 Doick and Hutchings(2013)는 지나치게 크기가 작은(0.05km2 미만) 녹지 공간의 냉각 효과는 무시할 만한

수준이므로 녹지 공간을 조성할 때 최소 유효 크기를 고려해야 한다고 지적한다.

#### 3. 현열속(sensible heat flux) 및 잠열속(latent heat flux) 변화

2절에서 설명한바와 같이 현열속은 표면온도와 대기온도의 온도 차이를 의미한다. 현열속은 표면과 기류 사이의 열 교환이므로 풍속이 중요한 파라미터로 취급된다(Mizaei and Haghighat, 2010). UCL 수준에서 표면 온도가 대기 온도보다 높은 경우 다음 방정식을 주로 사용한다

 $Q_{H} = \alpha (T_{s} - T_{a}), \ \alpha = \begin{cases} 6.15 + 4.18 U_{a} & U_{a} \leq 5m/s \\ 7.51 U_{a}^{0.78} & U_{a} > 5m/s \end{cases}$ 

*T<sub>s</sub>*와 *T<sub>a</sub>*는 각각 표면과 대기 온도, *U<sub>a</sub>*는 기준 높이 *Z<sub>a</sub>*에서의 풍속을 의미한다. α는 대류 열교환 계수로 풍속에 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 건물 사이에서 나타나는 소용돌이, 나선형류 혹은 채널링 현상(Belcher, 2005)은 지표면과 기류의 열 교환을 활발히 하여 현열속을 완화할 가능성이 있다.

잠열속은 물이 증발할 때 사용되는 에너지를 말한다. 두 지표의 비율인 보웬 비율은 증발 효율을 의미하는 것으로 잠열속을 증가시키면 지표면 부근의 온도를 낮추는 효과가 나타난다(Taha, 2008). 도시 시스템에서 일어나는 잠열속의 변화는 토양 및 공기 중 수증기의 양과 녹지가 만들어내는 증발산에 의한 영향이 크다. 증발산은 식생의 증산(transpiration)과 결합한 열전달 과정을 의미하며, 대기 중 수분(초본, 강수량, 습도 등)과 바람의 흐름에 영향을 받는다(Gunawardena et al., 2017). 불투수 포장된 표면은 증발냉각을 무효화하여 표면에 흡수된 태양열이 잠열로 소비되기 보다는 현열에 사용된다(Qin and Hiller, 2014). 이로 인해 표면 위 대기는 수분이 함유된 토양(soil)이나 초본(vegetation) 표면과 비교하여 더 높은 온도를 나타낼 것이다.

녹지는 증산 작용을 통해 물을 수증기로 변경하면서 잠열을 증가시키고 현열을 감소시킨다(Krayenhoff et al., 2014). 일반적으로 식물은 물의 99%와 흡수된 에너지의 절반 이상을 증산에 사용하며(Oke, 2002), 증산 속도는 잎 면적 지수(leaf area index, LAI)와 같은 식물 특성에 따라 다르게

일어난다(Armson et al, 2012). 증발산에 의한 열 에너지 소비량은 상당한 것으로 보고된다. 연간 전지구 증발산을 추산하면 지구 대기 상단에서 사용가능한 총 일사량의 약 22%를 차지한다(Qiu et al., 2013). 로컬 규모에서도 증발산 효과를 기대할 수 있다. 일반적으로 증발산 작용에 의한 효과가 그림자효과에 비해 적은 것으로 보고되지만, 녹지 면적이 넓어지는 등 규모가 커지는 경우 증발산효과가 우세해지는 경향을 보이기도 한다 (Zardo et al., 2017).

나무는 보다 다양한 효과를 통해 현열속과 잠열속을 낮추는 것으로 보고된다. 나무는 증발산 작용을 하고, 태양 복사를 줄이며 그림자 효과를 만들어 내어 열 환경을 개선하는 데 잔디보다 효과적이다(Lee et al., 2016). Morakinyo et al. (2016)는 일출 전 후 나무 그늘에서 Tmrt를 측정한 결과, 일출 전에는 2.5K 높았으나 일출 후에는 그 반대로 나타나는 것을 확인하였다. 네덜란드 아센 지역에서는 그늘이 있는 지역의 평균 기온이 그늘이 없는 지역에 비해 0.6~0.9K 감소하였으며, 덥고 건조한 날에는 3.3K까지 차이가 발생한다고 보고한다 (Wang et al., 2015). 따라서, 잎 면적이 큰 나무는 그늘 효과를 제공하고 증발산에 의한 온도 완화도 기대할 수 있다.

도시의 증발산 작용을 증가시키기 위해 도시의 벽면과 옥상에 식생을 조성할 수 있다. 벽면 녹화를 조성하였을 때, 벽의 표면 온도를 최대 24K까지 낮추었다(Bianco et al., 2017). 또한, 6m 이하 건물의 옥상을 녹화하는 경우 보행권 높이에서 최대 0.82°C의 기온이 저감되는 것으로 보고된다(Zhang et al., 2019). 옥상 녹화는 주간에 현열속을 줄이는 효과도 보고되므로(Song et al., 2018) 대체적으로 온도를 완화하는 데 긍정적이라고 평가할 수 있다. 다만, 표면 온도를 낮추는 대신 풍속을 감소시켜 대류에 의한 온도 완화에는 부정적일 가능성이 있다(Sharma et al., 2016, Zhang et al., 2019).

수 공간은 도시 공간의 온도를 떨어뜨리는 데 기여하는 주요한 요소이다. 수 공간에서 수증기가 생성되면서 소비하는 열 에너지는 주변의 공기 온도를 낮춘다(Manteghi et al., 2015). 수 공간의 온도 변화를 분석한 대부분의 연구는 흡수된 열 에너지가 물을 증발시키면서 현열을 잠열로 변환하는 증발 냉각에 초점을 맞춘다(Gunawardena et al., 2017). 현열과 잠열 교환의

크기는 지역의 기후 변화 및 대기 이류 현상에 따라 달라진다(Hathway and Sharples, 2012). 바람이 불어가는 쪽(leeward)의 기온이 불어오는 쪽(windward)과 비교해 온도가 낮고(Gomez et al., 2013), 건조한 지역은 증발 속도를 높여 온도를 더 저감한다(Oke, 2002). 그 밖에도 수 공간에 흡수된 열 에너지는 유체 흐름을 통해 시스템 밖으로 방출하는 효과도 기대할 수 있으며(Hathway and Sharples, 2012), 열 용량이 커 동일한 양의 태양복사를 흡수할 때 다른 재료보다 온도가 적게 상승한다(Chatzidimitriou and Yannas, 2015).

### 제 5 절 연구의 차별성

도시 캐노피 층(UCL)은 도시형태 요소(e.g., 건물, 나무)의 높이를 따라 형성된다(Oke, 2002). UCL 이하 공간은 인간활동이 집중되는 공간으로 에너지, 운동량, 물의 교환과 변환이 일어나는 장소이며(Oke et al., 2017), 도시 형태는 UCL 내부에서 일어나는 열 에너지 교환의 직접 혹은 간접 매개체가 된다. 앞서 살펴본 바와 같이 도시의 열 에너지 교환은 도시형태에 의한 열 저장, 열 이동, 현열속 및 잠열속의 변화를 통해 열 에너지의 균형을 이룬다. 이에 도시 온도에 대한 도시형태 기하학의 역할은 다양한 규모에서 여러 가지 도시형태 지표를 통해 밝혀지고 있다. 그러나 우리가 아는 한 수직 도시형태 지표를 체계적으로 정리하여 접근한 연구는 아직 없다.

수직 도시형태는 그늘 효과, 열 용량, 환기 성능을 조절해 도시의 열 에너지 교환에 영향을 미친다. 앞서 살펴본 것처럼 일부 연구는 수직 도시 형태를 반영한 도시 기하학이 도시 온도에 미치는 영향에 관하여 논의하였다. 건물의 높이가 증가하면서 만든 그늘은 도시 시스템 내부로 들어오는 태양복사량을 차단하여 열 환경을 개선한다(Silva et al., 2018; Zhang et al., 2020; Lai et al., 2019; Shih et al., 2017). 그늘 효과는 열대 지방의 열쾌적성을 완화하는 데에도 중요한 요인으로 제시된다(Emmanuel et al., 2007). 반면, 증가된 높이는 장파복사를 가두고(Morakinyo et al., 2016), 단파복사를 더 많이 반사하며(Chatzidimitriou and Yannas, 2015), 열을 더 많이 흡수해(Grimmond and Oke, 1999; Santamouris, 2013) 도시의 온도를 높인다. 도시화된 지역의 높은 건물 밀도는 열섬 효과 강도를 심화하는 주요한 요인이다(Li et al., 2020).

도시의 온도에 영향을 미치는 주요한 요인 중 하나인 환기성능도 건물의 형태와 구조에 의존한다. 형태학적 특성의 변형 및 바람 방향과의 상호 작용은 도시의 열 환경 저감을 위한 새로운 전략의 가능성을 열어주었다(Hang et al., 2009; He et al, 2019). 그러나 바람이 실제 흐르는 구조는 주변 건물의 간섭 효과로 인해 훨씬 더 복잡하며, 이 때 서로 다른 건물 주변의 흐름 구조가 중첩, 상호 작용, 중립화 및 상쇄될 수 있다(Mou et al., 2017). 도시 협곡으로 인한 거칠기 증가는 바람의 수평 이동을 간섭하여 환기를 저하하는 것으로 알려져 있지만(Li et al., 2020), 거칠기 증가로 인해 풍속이 낮아졌음에도 도시 기하학에 따라 바람의 분포가 공간적및 시간적으로 매우 다양해질 수 있다고 보고한다(Givoni, 1998). 또한, 건물의 높이 차이와 건물 사이 간격을 적절히 조정하면 환기 성능이 개선되기도 한다(Shareef, 2021; Ng, 2009; Merlier et al., 2018).

이 연구는 로컬 규모에서 수직 도시형태에 의해 나타나는 온도에 초점을 둔다. 이전 연구는 부분적으로 로컬 규모에서 대기 온도에 영향을 미치는 수직 도시형태 지표를 제시한다. 그러나 고층 건물이 밀집한 특정 지역을 모사하여 시뮬레이션 연구를 진행하거나(Zhang et al., 2020) 고층 건물의 특성을 나타내는 몇 가지 변수(i.e., SVF, TSF)에 의존하였다(Shih et al., 2017; Equere et al., 2021). 시뮬레이션 연구와 같이 수치 모델에 의존하는 결정론적 접근(Deterministic approach)은 이상적인 이론을 바탕으로 모델을 구성하므로 오염물질 거동의 비선형성 및 이질성을 설명하기에 충분하지 않으며, 수치 모델이 통제하는 연구 대상 지역의 크기가 한정적일 수밖에 없다. 여전히 로컬 규모에서 지역 간의 차이를 살펴보기 위한 공간의 압축성에 대한 널리 받아들여지는 지표는 부족하고, 수용가능한 측정 기준이 불일치하다는 도전적인 문제가 지속되고 있다(Shirowzhan et al., 2018).

로컬 규모에서 도시 기후를 도시 계획과 설계에 고려하기 위해 도시 형태의 수직 및 공간 특성을 반영하는 지표가 고려되어야 한다. 도시형태 지표는 도시계획 현장에서 사용하기 용이하도록 도시형태 및 토지이용과 관련된 매개변수를 이용하는 것이 중요하며, 수직 도시형태를 나타내는 지표는 현재 개발이 완료된 지역, 개발이 일부 완료된 지역과 신규 지역 모두에 적용이 가능해야 한다. 예컨대, FAR과 같이 계획가 혹은 건축가가 직접 적용할 수 있는 매개변수를 사용하고, 거칠기 길이(z0), 제로 평면 변위(zd)와 같은 전문 매개 변수는 피하는 것이 좋다(Yang and Chen, 2020).

또한, 수직 도시형태는 UCL 내부의 기류를 다양하고 복잡하게 만들었다. 이로 인해 UCL 내부의 열 에너지 균형과 이동이 공간 이질적이고 복잡해져 그 개념을 일반화하기 위해 결론을 비교하고 종합하기 어렵게 만들었다(Merlier et al., 2018). 도시의 다양한 요소(e.g., 도시 크기, 프랙탈러티(fractality)와 비균등성(anisometry))는 복잡하게 상호작용하여 도시의 온도 증감에 영향을 미치며(Zhou. B et al., 2017), 서로 다른 도시개발패턴(고층 혹은 고밀도)에 따라 도시 기후의 공간적인 패턴이 다르게

나타나기도 한다(Zhou. X, et al., 2018). 이에 도시의 온도 조절 현상과 도시형태와의 복잡한 관계를 이해하기 위해서는 도시형태 요소의 개별 영향과 도시형태 간의 상호작용에 대한 통찰력이 필요하다.

도시형태 변수 간의 상호작용을 살펴보기 위해서는 보다 직관적이고 도시형태의 본질적인 요인을 다룰 수 있어야 한다. 본질적인 요인은 도시 크기, 토지피복과 같이 규제되고 재구성하는 것이 가능한 도시 특유의 특징을 의미한다(Zhou B., et al., 2017). 이에 이 연구는 로컬 규모에서 대기 온도에 대한 도시형태의 본질적인 요인의 영향과 요인 간의 상호작용을 추적할 수 있는 수직 도시형태 지표를 제안하였다. 이를 토대로 제안된 지표와 지표 간의 상호작용이 도시 온도에 어떻게 영향을 미치는지 살펴보고자 한다.

# 제 3 장 연구 가설

### 제 1 절 논거

1. 수직 도시형태 지표

이 연구는 로컬 규모에서 대기 온도에 대한 도시형태의 본질적인 요인의 영향과 요인 간의 상호작용을 추적할 수 있는 네 가지 수직 도시형태 지표를 고려하였다. 네 가지 지표는 1) 높이(Vertical), 2) 변위(Variance), 3) 체적(Volume), 4) 개방성(Vacant)이다. 제안된 수직 도시형태 지표는 선행 연구를 바탕으로 온도에 미치는 영향을 고려하여 선정하였다.

#### 높이(Vertical)

건물을 비롯한 도시 내 구조물의 높이는 도시 기후에 상당한 영향을 미친다. 높은 건물은 그늘 효과, 열 용량, 환기성능에 영향을 미쳐 지역의 열 에너지를 조절한다. 그늘 효과는 높은 건물이 태양복사열의 입사를 막아 건물 주변부 온도를 낮추는 효과를 말한다. 건물의 높이가 높아질수록 건물 주변 온도가 낮아져 보다 나은 열 쾌적성을 보인다(Silva et al., 2018; Zhang et al., 2020). SVF가 낮거나 H/W가 높은 지역, 즉 고층 건물이 조성된 지역은 건물과 지표면이 태양 복사에 덜 노출되어 열적 쾌적성이 높게 나타난다(Lai et al., 2019; Shih et al., 2017). 심지어 나무와 같은 녹지가 없는 지역에서도 도시 열섬을 완화하여 쾌적한 열 환경을 조성하는 것으로 알려져 있다(Johansson et al., 2013).

그러나 높은 건물은 표면에서 방출하는 장파 복사를 가두어 대기 온도를 증가시키거나(Morakinyo et al., 2016) 피복 재질의 종류에 따라 열을 흡수하거나 반사하는 작용을 통해 대기 온도를 증가시킨다. 반사도가 높은 피복재질은 단파복사열을 대기 중으로 반사하여 표면 온도를 낮추고 장파복사를 감소시키지만(Taha et al., 1988), 오히려 반사된 단파복사가 표면 위 공기를 데워 온도를 증가시키는 것으로 보고한다(Chatzidimitriou and Yannas, 2015). 고층건물은 복사열에 노출되는 표면적이 넓어 반사도가 높은 재질로 지어진 고층 건물에서 반사되는 단파복사가 온도에 미치는

영향이 상당할 것이다. 또한, SVF가 낮거나 H/W가 높은 거리는 장파 복사를 더 많이 가두어 온도를 증가시킬 수 있다.

환기성능은 긍정적이고 부정적인 효과가 모두 나타난다. 일반적으로 고층 형태를 보이는 지역은 저층 형태 지역에 비해 더 강한 난기류를 생성하고, 지면에 더 나은 환기를 제공한다(Kubota et al., 2008). 높은 건물에 의해 만들어지는 소용돌이, 나선형류, 채널링 현상은 환기에 도움이 되기 때문이다(Belcher, 2005). 그러나 높을수록 환기 성능에 긍정적이지만은 않다. 협곡 효과를 살펴본 시뮬레이션 연구에서 증명되었듯이 어느 정도 높은 수준의 건물(H/W=1)은 도시 내부의 따듯한 공기를 협곡 밖으로 잘 운반하지만 높이가 더 높아지면(H/W=2) 내부 풍속이 저하되어 온도가 높아지는 경향을 보인다(Schrijvers et al., 2020). 더불어 건물이 밀집되어 바람의 수평 이동이 원활하지 않은 지역에서는 환기 성능이 저하될 수 있다. 더 개방적인 도시 형태는 표면이 바람에 더 많이 노출되며(Taleghani, 2014), 협소한 장소에 비해 풍속도 증가하므로(Wang and Akbari, 2014), 환기성능에 긍정적이다.

#### 변위(Variance)

도시에 조성된 건물은 높이가 매우 다양하다. 토지이용에 따라 주거, 상업, 공업지역에 조성된 건물의 높이가 다르고, 같은 토지이용 내에서도 제각기 다른 높이를 갖는다. 예컨대, 주거지역에 조성된 주택의 종류는 단독주택, 다세대 주택, 빌라, 아파트, 주상복합 등으로 구분되며, 종류에 따라 기대 높이가 다르다. 같은 종류의 주택, 심지어 같은 아파트 단지 내에서도 건물의 높이가 다르게 나타난다. 지역의 건물 높이 수준은 거주자의 일조권, 조망권과 경관을 위한 스카이라인 기준에 따라 어느 정도 비슷한 경향을 보이지만 지역의 용도(e.g., 도심지, 부도심지), 건축 목적과 시기의 차이 등의 이유로 로컬 규모에서 혼재되어 있는 것이 일반적이다.

다양한 건물 높이는 건물의 높이 차이를 통해 효과적인 그늘효과를 제공하고 환기 성능도 향상시키는 것으로 알려져 있다. Shareef(2021)는 두바이를 대상으로 건물의 방향을 고려하여 건물의 높이를 다양하게 구성하고, 실외 온도 변화와 그로 인한 실내 에너지 소비를 측정하였다.

건물의 높이 차이는 태양열 노출을 막아 실외 온도를 저감하는 데 효과적이었으며, 4.6%의 냉각 부하 감소를 달성하였다. 열대 지역의 따뜻하고 습도가 높은 환경에서도 다양한 건물 높이를 가진 도시 협곡은 단파복사의 입사를 막고, 보행자 수준에서 풍속을 향상시켜 균일한 높이의 협곡에 비해 열 환경이 쾌적하였다(Sharmin et al., 2017).

다양한 높이가 환기 성능에 미치는 영향은 조금 복잡하게 나타난다. 평평한 지형에서는 자유롭게 흐르던 바람은 장애물을 만나면서 우회하는 경향이 있다. 일련의 불합리한 계획 패턴으로 인해 건물은 신선하고 충분한 바람이 도시를 가로지르는 것을 막는 울타리가 되었다(Yim et al., 2009). 건물에 의해 차단된 기류는 지붕과 측면에서 풍향이 분리되고, 지붕과 측면에서 다시 결합하며, 소용돌이(horse vortex), 공동 구역(cavity zone) 및 난류 후류(turbulent wake)와 같은 일련의 현상을 겪는다(He et al., 2019). 이에 상류 지붕과 측면 주변에서는 풍속이 훨씬 더 높은 경우가 발생하지만, 하방풍력(downwash) 및 가로막힘 효과(shielding effects), 정체 현상 등으로 인해 상류 및 하류 일부 영역에서는 풍속이 낮아진다(Tsang et al., 2012).

건물 지붕 높이(Merlier et al., 2018)와 모양(Toja-Silva et al., 2015)은 건물 주변의 바람 흐름에 결정적인 역할을 한다. 높이의 변위는 건물 사이 와류를 형성하여 환기 성능에 영향을 미친다. 건물 지붕 위의 바람이 전단 효과(shear effect)를 받아 지표면으로 내려오면서 풍속이 점차 감소하므로(Hang and Li, 2011), 건물의 높이 차이를 두어 낮은 건물 지붕에서 거리로 내려오는 바람에 의한 환기 성능을 어느 정도 기대할 수 있다. 더불어 건물 사이 공간, 즉 거리 협곡의 종횡비에 의해 상호작용하여 환기 성능을 결정한다. 예컨대, 종횡비가 낮아 건물 사이 거리가 0.05에서 0.3 사이인 경우에는 상호작용하지 않으나 종횡비가 증가하면 앞 건물 뒤에 생기는 후류 와류(wake vortexes)와 뒤 건물 앞에 생기는 볼스터 와류(volster vortexes)가 서로 간섭하여 바람이 정체되거나 풍속이 크게 저하된다(Oke, 1988). 또한, 높이 차이로 인해 대기에서 발생하는 양압과 음압으로 인해 공기 이동과 도시 환기를 촉진할 수 있다(Ng, 2009).



[그림 3-1] 건물 가장자리와 건물 사이 협곡에서 나타나는 바람 흐름 모식도: a. 도시 거칠기(캐노피를 통한 수직 교환)와 도시 투과성(수평 흐름경로 및 재순환) (Merlier et al., 2018). b. 협곡 종횡비(H:W)와 바람의 흐름(He et al., 2019).

#### 체적(Volume)

건물의 체적은 그늘 효과, 열용량, 환기성능에 영향을 미쳐 지역의 열 에너지를 조절한다. 건물의 체적은 건축면적이 같다면 건물의 높이와 비례하여 증가하므로 고층 건물이 갖는 열 환경 이점을 공유한다. 예컨대, 여름철에 건축 면적이 일정할 때 건물이 높아지면 그늘 효과를 통해 거리의 최대 온도가 낮아져 열 환경이 개선된다(Zhang et al., 2020). 그러나 부피 증가에 의한 총 온도 증가는 높이로 인한 그림자 효과의 온도 저감 효과를 상쇄하고 도시의 온도를 증가시킬 만큼 강력하다(Li et al., 2020). 늘어난 불투수 피복 표면의 특성 — 낮은 알베도, 높은 열용량 및 높은 열 전도율 — 으로 인해 잠열속이 감소하고 시스템의 열 흡수량이 증가하며(Oke et al., 2017), 피복에 반사되어 나가는 장파복사를 더 강하게 포획하기 때문이다(Li et al., 2020).

건물 체적의 증가는 건물 피복 재질의 역할을 고려하면 현열을 증가시키는 데 기여하는 바가 클 것이다. 건물과 같은 인공구조물의 일반적인 피복 재질은 태양열을 과도하게 흡수하여 도시 열섬의 발달에 크게 기여하였다(Santamouris, 2013). 나무는 일반적으로 가시광선의 10%, 적외선의 30%만 통과시키고(Brown and Gillespie, 1995), 식생은 증산작용을 통해 잠열을 증가시킴으로써 태양 복사에너지를 흡수한다(Taha et al., 1988). 반면, 도시의 건조환경을 구성하는 주재료인 콘크리트와 같은 재료는 열 관성이 크고 표면이 어두워 태양복사를 흡수하고 저장하는 경향이 있다(Grimmond and Oke, 1999). 또한 건물에 흡수된 열이 거의 대부분 현열에 사용되므로 잠열에 의해 열 에너지가 소비되는 식생 지역에 비하여 온도가 높게 나타난다(Qin and Hiller, 2014).

체적은 일반적으로 공간의 밀도를 대리하는 변수로 사용되었다. 기존 연구(Li et al., 2020)는 도시의 공간 밀도(체적)와 열섬 효과 강도 사이의 뚜렷한 양의 선형관계를 보고한다. 토지이용변화로 인해 도시화 밀도가 높은 지역의 온도가 농촌에 비해 높게 나타나는 것은 놀라운 일이 아니다(Kalnay and Cai, 2003). 그러나 일부 연구는 오히려 도시의 밀도 증가를 통해 도시의 온도를 낮출 수 있다고 보고한다. Mirkovic and Alawadi(2017)는 밀도를 높이되 건물의 높이와 간격을 조정하여 건물에 흡수되는 태양복사량을 낮추는 최적의 조건이 있음을 보고한다. 공간 밀도에 대한 상충되는 결과는 도시 높이의 그늘 효과에 의한 온도 저감과 건물의 체적 증가로 인한 온도 상승, 그리고 그 상호작용 효과에 대한 오해에서 비롯되었다. 따라서, 건물의 높이, 체적, 간격을 고려한 공간 밀도의 영향을 보다 자세히 살펴볼 필요가 있다.



[그림 3-2] 건물 밀도와 열 에너지 관계. a. 일정한 크기의 도시에서 건물 체적과 열섬 강도 그래프(Li et al., 2020); b. 건물 높이 및 간격과 건물의 태양열 획득량(solar gain)의 총 감소율 그래프(Mirkovic and Alawadi, 2017)

체적의 증가는 환기성능에 부정적으로 기여할 것이다. 바람이 불어오는 쪽에 큰 건물이 위치해 있거나 부피가 큰 건물은 차폐 효과를 향상시켜 건물 뒤에서 형성되는 바람의 날개 속도를 지속적으로 낮출 수 있으며, 주변 건물의 배치와 구조와 간섭 효과를 발생시켜 중첩, 상호작용, 중립화(neutralization) 및 상쇄 기류가 발생하여 환기 성능을 저하시킬 수 있다(Mou et al., 2017).

#### 개방성(Vacant)

도시의 개방성은 공기통로 형성을 통한 도시의 투과성을 의미한다. 건물 밀도가 적절할 때 각 거리 협곡을 통해 공기가 흐를 수 있다(Merlier et al., 2018). 근린규모에서 환기효율은 건물밀집도가 지배적인 요인으로 나타난다. 건물이 희박한 도시에서 압축 도시에 이르기까지 건물 밀도가 증가하면 환기 효율이 감소한다(Buccolieri et al, 2010). 기존 연구는 여름에 풍속이 1.0 m/s에서 0.3 m/s로 감소하면 온도가 1.9 °C가 증가하고(Cheng et al., 2011), 오픈스페이스보다 압축적인 공간에서 풍속이 3.5 m/s에서 1.0 m/s으로 줄어들면 PET(physiological equivalent temperature)가 6.5K 증가하는 것으로 보고한다(Andreou, 2013). 이 때문에 고밀도 도시에서 적절한 자연 환기를 보장하여 도시 투과성을 최적화하는 것은 도시 계획가와 건축가가 직면한 주요 문제이다(Yuan and Ng, 2012).

환기 성능을 향상시키고자 건물 간의 거리를 넓게 배치하고, 낮은 건물을 주로 조성하면 공간에 입사되는 단파복사량이 증가하면서 공간의 온도를 높일 수 있다. 기존 연구(Tan et al., 2013; Wang et al., 2016)는 SVF의 증가에 비례하여 공간의 평균 복사온도가 높아진다고 보고하며, 노출된 지역의 최대 PET가 그늘진 지역에 비해 최대 10K 높게 도출되기도 하였다(Andreou, 2013). 열대 도시에서 알베도, 종횡비 및 건물 사이의 거리는 공간에 흡수되는 태양복사 변화량의 약 80%를 차지할 만큼 상당한 영향력을 미치는 중요한 요소이다(Martins et al., 2016).

개방성은 다른 지표와 함께 해석할 때 강력한 의미를 줄 수 있다. 예컨대, 개방성과 체적 지표가 대기 온도에 미치는 영향을 비교하여

그늘효과와 환기성능 효과를 간접적으로 비교해 볼 수 있다. 또한, 높이 변수와 비교할 수 있다. 개방성이 낮고 건물 평균높이가 높은 공간의 대기온도 변화를 통해 그늘의 온도 저감 효과를 이해할 수 있다.

개방성은 도시 형태의 오픈스페이스를 통해 측정할 수 있다. [그림 3-3]은 동일한 용적률인 두 지역 (a)와 (b)의 개방감 차이를 보여주는 모식도이다. 건물 밀도는 두 지역이 동일하지만 (b) 지역이 (a) 지역에 비해 개방감이 좋아, 보다 나은 환기 성능을 보여줄 것으로 기대된다.



[그림 3-3] 용적률이 동일한 두 지역의 공간 개방감 차이 모식도

#### 2. 수직 도시형태의 상호작용 효과

도시 형태는 서로 상호작용하여 대기 온도에 미치는 영향을 서로 상쇄하거나 시너지를 내며 복합적인 결과를 만든다. 그늘 효과와 환기 성능으로 인한 열 조절의 모순적인 효과는 눈 여겨볼 만하다. 그늘 효과와 환기성능은 모두 열 환경을 완화하는 중요한 요인이지만 두 효과를 모두 최적화하여 도시에 적용하는 것은 어려운 일이다. 예컨대, 밀도가 높아지면 건물 주변의 풍속이 양극화되고 약한 바람 환경이 우세해져 환기 성능이 저하되지만 건물 간 거리가 좁아지면서 그늘 효과에 의한 온도 저감 효과가 증가한다(Giridharan and Emmanuel, 2018).

두 효과는 압축적인 공간과 오픈스페이스의 열 환경을 비교함으로써 확인 가능하다. 대체로 압축적인 공간은 오픈스페이스보다 더 나은 열 환경을 보였다. 그늘진 지역과 노출된 지역은 최대 PET 차이가 10K로 나타나지만(Cheung and Jim, 2018), 더 나은 환기 성능을 보이는 풍속 3.5m/s인 지역과 1.0m/s인 지역의 PET 차이는 6.5K에 불과하였다(Andreou, 2013). 효과의 크기 차이를 고려하면 그늘 효과를 적용하는 것이 온도를 저감하는 데 더 유리하다. 대체로 압축적으로 조성된 도시에서 더 나은 열 환경을 보였으며, 그늘 효과는 열 환경을 개선하기 위한 좋은 접근방법이었다.

한편, 도시형태에 따라 환기 성능 향상은 여전히 열 환경을 개선시키는 주요한 수단이 될 수 있다. Lai et al.(2019)는 도시의 기하학적 특징과 열섬 완화의 관계를 검토하면서 압축 공간은 높은 건물에 의해 긴 시간 동안 그늘 효과가 지속되어 식생, 반사 포장도로 및 수 공간이 생성하는 유효 냉각 시간을 감소시키기 때문에 압축도시 공간에서는 식생, 반사 포장도로 및 수 공간이 큰 효과가 없다고 주장한다. 이러한 공간에서는 환기 성능이 온도를 저감하기 위한 매력적인 수단이 될 수 있다. 또한, 도시에 높은 건물이 산재해 있는 경우 건물의 높이와 체적이 다양한 공간에서 보행자 수준의 환기 성능이 더 나은 결과를 제공하므로(Rajagopalan et al., 2014) 열 쾌적성에 긍정적인 영향을 줄 것으로 기대할 수 있다. 더불어 환기 성능은 대기오염을 분산하는 주요한 요인이다(Yang et al., 2020). 대기오염농도의 증가는 열섬 효과 강도를 상승시키므로(Ngarambe et al., 2021), 이러한 도시에서는 환기성능이 온도 조절에 매우 중요하게 작용할 수 있다.

도시의 건물 높이, 도시화 면적(urban fraction)과 건물 체적의 상호관계도 도시의 열섬 효과 증감을 설명한다. 베를린의 21개 단핵도시(mono-centric)를 대상으로 시뮬레이션 한 결과 건물 높이와 도시화 면적이 증가하면 열섬 효과가 증가했으며, 높이 보다는 도시화 면적의 영향이 더 크게 나타났다(Li et al., 2020). 저자는 높이 증가의 영향이 도시화 면적 증가보다 작게 나타난 이유를 높은 건물이 만드는 그늘 효과의 영향으로 추정한다. 이 연구의 결과는 동일한 체적을 가진 도시에서 고층 건물이 많은 도시가 상대적으로 쾌적한 열 환경을 조성하며, 만약 거리 협곡 종횡비가 커지면 더 나은 환경을 제공한다고 보고한다.



[그림 3-4] 베를린 도시화 시나리오에 따른 열섬 강도 변화(Li et al., 2020)

도시형태의 상호작용이 복잡한 것은 계절에 따라서도 다른 결과를 낳기 때문이다. 여름은 낮 시간 동안 증가된 태양복사가 도시 시스템의 에너지를 직접적으로 증가시켜 열섬 효과를 극대화하고, 낮 시간 동안 건물에 흡수된 열 에너지가 밤에 대기로 방출되면서 도시를 가열하여 열악한 기후가 조성되는 계절이다(Grimmond et al., 2010). 또한, 여름에 도시의 표면은 여름에 더 많은 복사열을 반사하는데, 이를 통해 표면 온도를 낮추어 장파복사를 줄이는 효과가 있지만(Chatzidimitriou and Yannas, 2015), 반사된 단파복사가 낮 시간 동안 대기를 한층 더 가열시켜 열악한 열 환경을 조성한다.

열악한 열 환경은 여름에는 에어컨 사용을 증가시켜 냉방 부하를 높이고, 겨울에는 난방 기기 사용이 증가해 난방 부하를 증가시킨다. 이러한 인위적인 에너지 방출은 주변 지역의 온도에 중요한 영향을 미치고, 도심의 열섬 강도를 높이는 역할을 한다(Santamouris, 2001). 그늘 효과는 여름에는 압축적인 공간이 유리한 열 환경을 조성도록 돕지만 겨울에는 불리하게 만든다. 여름에 도시의 기하학이 만드는 깊은 협곡과 얕은 협곡의 기온차이는 모로코에서 최대 6K까지 나타나 깊은 협곡이 열 환경에 유리한 것으로 나타나지만, 겨울에는 태양복사열이 깊은 협곡에 도달하지 않으므로 얕은 협곡이 더 나은 열 쾌적성을 보여준다(Johansson, 2006).

## 제 2 절 가설

도시는 수직형태가 만드는 개별 효과와 상호작용 효과를 통해 도시의 온도를 조절한다. 그러나 도시형태의 상호작용이 만드는 열 에너지 균형과 이동 효과는 공간 이질적이고 복잡하여 비선형적인 결과로 나타난다(Merlier et al., 2018). 로컬 규모는 다양한 도시형태가 섞여 있어 상호작용 효과를 더 부추길 것이므로 일반화된 결론을 내리기 어렵고 도시형태의 효과를 이해하기 어렵게 만들 것이다. 만약 로컬 규모에서 도시형태의 상호작용을 이해할 수 있다면 도시의 온도를 조절하는 보다 정확하고 세밀한 전략을 세우는 것이 가능하다.

이 연구의 주요한 질문은 수직 도시 형태가 도시 대기온도에 어떠한 영향을 미치는가? 이다. 선행연구와의 차별성을 바탕으로 이 질문에 접근하기 위하여 세 가지 하위 질문으로 세분화하였다. 세 가지 하위 질문과 가설은 논거를 통해 체계화한 네 가지 수직 도시형태 지표를 바탕으로 도시 온도에 대한 지표의 개별 효과 및 지표 간의 상호작용 효과를 살펴보기 위하여 설정하였다.

하위 질문 1. 수직 도시형태는 도시 대기온도에 어떻게 영향을 미치는가?

가설 1-1. 네 가지 수직 도시형태 지표(높이, 높이 변위, 체적, 개방성)는
온도 조절 효과의 크기와 중요성이 다르게 나타날 것이다.

논거에서 살펴본 바와 같이 선행연구는 네 가지 수직 도시형태 지표가 열 저장, 열 이동, 현열속 및 잠열속 변화를 통해 도시의 대기온도를 증가 혹은 감소시킨다고 보고한다. 구체적으로 열 저장은 단파복사 반사, 열 흡수, 그늘 효과, 대기오염물질 농도, 열 이동은 거칠기, 환기 성능, 거리 협곡, 현열속 및 잠열속은 풍속, 증발산, 잠열을 통해 온도를 조절하였다. 네 가지 지표의 온도 조절 효과는 대체로 일관된 방향으로 나타나지만 그 효과의 크기는 다르게 나타날 것이다.

수직 도시형태 변수가 대기 온도에 미치는 영향은 일관된 방향으로만 나타나지 않는다. 대표적으로 네 가지 지표는 그늘 효과를 통해 대체로 도시의 온도를 감소시키지만(Zhang et al., 2020; Shareef, 2021; Lai et al., 2019) 고층 건물에 반사되어 방출되는 태양복사를 가두는 효과로 인해 온도가 증가하기도 한다(Li et al., 2020). 또한, 밀도의 증가는 환기 성능을 저하하지만 그늘 효과를 증가시킨다(Giridharan and Emmanuel, 2018). 열 흡수, 환기 성능, 협곡 효과에 의한 온도 조절도 모순적인 효과가 나타나 어떤 효과가 더 우세하게 나타나는지에 대한 물음이 남아 있다(Li et al., 2020).

 가설 1-2. 수직 도시형태의 온도 조절 효과는 계절에 따라 상이하게 나타날 것이다.

선행연구는 여름과 겨울에 도시형태 요소가 미치는 영향이 서로 모순적으로 나타난다고 보고한다. 특히 여름철에는 낮에는 태양복사가 증가하여 도시의 온도를 증가시키고, 저녁에는 낮 동안 도시에 흡수된 열 에너지가 방출되면서 열대야 현상 등을 만드는 부정적인 효과가 극대화된다. 따라서, 온도를 고려한 도시형태는 여름과 겨울에 미치는 영향을 모두 고려할 필요가 있다.

하위 질문 2. 수직 도시형태의 상호작용은 도시 대기온도를 어떻게 조절하는가?

가설 2. 수직 도시형태 지표는 서로 상호작용하여 열 조절을 상쇄하거나
시너지를 더할 것이다.

논거에서 제시한 바와 같이 높이, 체적, 개방성의 상호 관계에 대한 이해가 필요하다. 흔히 체적 총량으로 나타나는 공간 밀도는 온도를 증가시키는 것으로 보고되지만(Li et al., 2020), 공간 밀도를 높이와 개방성의 상호작용으로 살펴볼 경우 온도가 감소하는 결과가 나타난다(Mirkovic and Alawadi, 2017). 또한, 건물의 높이 차이는 거리 수준의 환기 성능을 증가시켜 온도를 감소하리라 기대되지만(Merlier et al., 2018), 건물 간의 거리 즉, 개방성을 고려할 때 온전히 이해할 수 있다. 도시 온도에 대한 수직 도시형태 지표 간 상호관계를 이해하는 것은 쾌적한 도시 기후를 위한

바람직한 정책적 접근을 가능하게 할 것이다.

하위 질문 3. 도시형태 유형에 따른 효율적인 온도 조절 전략은 무엇인가?

 가설 3. 로컬규모에서 도시형태의 유형에 따라 수직 도시형태 지표의 중요도가 다르게 나타날 것이다.

로컬 규모에서 복잡하게 나타나는 도시형태의 기하학적 효과와 수직 도시형태 간의 상호관계는 도시의 온도 조절에 대한 이해를 어렵게 한다. 특히 수직 도시형태 간의 상호관계에 의한 효과는 로컬 규모에서 지표의 중요도와 영향력의 크기를 다르게 만들 것이다. 이에 이 연구는 로컬규모에서 도시형태의 유형을 군집화하고, 군집별로 어떤 수직 도시형태 지표가 중요하게 나타나는지 확인하였다. 예컨대, 저층 건물 밀집지역과 고층 건물 밀집지역은 온도 조절에 미치는 지표의 중요도가 다르게 나타날 것이다. 온도 조절에 미치는 수직 도시형태 지표의 군집별 차이를 이해하는 것은 도시계획적으로 기후를 고려하는 데 상당한 함의를 줄 수 있다.

세 가지 하위 질문과 가설을 중심으로 이 연구는 수직 도시형태가 대기 온도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 1) 수직 도시형태 측정 지표를 제안하였으며, 2) 제안한 지표를 사용하여 수직 도시형태가 대기 온도에 미치는 영향을 그들의 상호작용과 함께 살펴볼 것이다. 수직 도시형태의 상호작용 효과는 로컬규모에서 분류되는 도시형태의 유형에 따라 영향력에 차이를 만들 것으로 기대된다. 이에, 3) 수직 도시형태의 계절(여름과 겨울)에 따른 영향과 로컬 규모에서 도시형태의 유형에 따른 영향을 나누어 살펴봄으로써 도시계획을 위한 실천적인 함의를 탐구하였다.

# 제 4 장 연구 방법

## 제 1 절 연구 대상지역

1. 대상지 현황

이 연구는 수직 도시 형태가 도시 기후에 미치는 영향을 확인하기 위해 한국의 수도인 서울을 대상으로 연구를 진행하였다. 서울은 면적 605.96 km<sup>2</sup>, 인구 9.586 백만인 도시로 인구밀도가 15,845 인/km<sup>2</sup>에 달한다. 서울의 인구밀도는 OECD 국가 중 가장 높은 수준이다. 서울은 건조된 지역(built area)에 다양한 도시 형태가 조성되어 있고 투수 지역에 다양한 형태의 녹지와 수공간이 존재하여 도시 형태가 도시 기후에 미치는 영향에 관하여 살펴보기에 적합하다.



서울은 3도심, 7광역중심 12지역중심의 다핵 중심지체계로 구성되어 있으며, 주거(308.81km<sup>2</sup>, 51%), 상업(26.05km<sup>2</sup>, 4.3%), 공업(27.65km<sup>2</sup>, 4.6%), 녹지(243.45km<sup>2</sup>, 40.2%)의 용도지역으로 계획 및 관리되고 있다(서울특별시, 2014). 중심지는 기능적으로 특화되어 있는데, 도심은 서울의 경제, 행정, 문화, 산업의 중심지로 토지이용 기준의 집약도지수(Central Business Intensity Index, CBII)와 중심업무고도지수(Central Business Height Index, CBHI)가 매우 높다. 광역중심지는 도심의 기능을 보완하면서 지역균형발전을 도모하여 권역별 자족성을 제고하며, 지역중심지는 보다 작은 생활권 단위에서 고용기반을 마련하고 자족성을 강화한다.

서울의 도시형태는 토지이용과 용도구역에 따라 다른 특성을 보인다. 대체적으로 대중교통접근성이 좋고, 주거와 비주거 기능이 입체적으로 구성되어 직주 근접의 실현을 목표로 한다. 건물의 밀도와 높이는 중심지 기능 및 역할에 따라 관리되며, 도시계획조례에 따라 건물의 용적률이 설정된다. 눈여겨볼 점은 지역의 용도에 따라 정량적인 층수 기준을 두어 높이를 관리하는 점이다. 51층 이상의 초고층 건물은 도심·광역중심 내 상업 및 준주거지역으로 입지가 한정되고, 주거 지역은 35층을 넘어설 수 없다. 주요 산과 구릉지에는 저층 건물만 들어설 수 있고, 한강변에는 스카이라인을 고려하여 건물을 조성해야 한다. [표 4-1]은 서울시 건물의 층수 기준을 요약한다.

용도		도심·광역중심	지역·지구중심	그외지역
상업·준주거	복합	51층 이상 가능	50층 이하	복합: 40층
	주거	35층 이하	35층 이하	이하
준공업	복합	50층 이하		주거: 35층
	주거	35층 이하		이하
일반주거	복합	50층 이하		35층 이하
	주거	제3종 일반: 35층 이하, 제2종 일반: 25층 이하		

[표 4-1] 서울시 건물 층수 기준

2. 서울의 수직 도시형태 특성

#### 도시 구조

이 연구에서 제안한 수직 도시형태의 네 가지 지표를 따라 도시 형태를 구분해 보았다. 서울의 중심지는 평균 높이가 높고, 높이 변위가 크고, 공간밀도가 높으며, 개방성이 보통 이상인 형태를 띤다. 대체로 상업지에서 건물의 평균 높이가 더 높고 조밀하게 나타나고, 높은 건물이 밀집한 지역은 획일적이지 않고 다양한 높이로 구성되어 있음을 확인할 수 있다. 건물의 높이가 높아 건물이 공간을 차지하는 밀도가 비교적 높지만, 대규모 아파트 단지로 조성된 주거지역은 건물 간 거리가 비교적 넓고 건물이 균일하게 배치되어 보다 나은 개방성을 보인다.



[그림 4-2] 서울시 고층 건물 밀집지역

주거용 건물이 밀집한 지역은 평균 높이가 보통이고, 획일적이며, 공간밀도가 보통 혹은 낮고, 개방성은 낮은 경향을 보인다. 도로를 위한 최소한의 면적을 경계로 비슷한 면적과 높이의 건물이 밀집되어 있다. 산이나 구릉지에 인접한 지역에는 대부분 저층 혹은 중층 건물이 조성되어 있고, 지형에 따라 보다 나은 개방감을 보여주기도 한다.



[그림 4-3] 서울의 중층 및 저층 건물 밀집지역

서울은 일부 준공업지역이 조성되어 있다. 이 지역은 건물의 높이가 낮고, 가까운 곳에 주거지가 위치해 건물의 높이 변위가 다양하게 분포해 있다. 공간 밀도가 낮은 편이지만 건축밀도가 높아 개방감이 그리 뛰어나 보이지 않는다. 일부 지역은 간선도로 가까이 위치해 있다. 간선도로와 지역을 잇는 도로의 폭이 넓고, 교차로가 많아 도로 연결성이 좋아 보인다. 녹지로 둘러 쌓인 지역은 대체로 건물의 높이가 낮고 나무의 높이가 비슷하게 나타난다. 공간에서 나무가 차지하는 비율이 높아 공간밀도는 높지만 비슷한 수준의 건물 밀도와는 온도에 미치는 영향이 다른 양상을 보일 것이다. 또한, 서울의 중심을 관통하는 한강에 인접한 지역은 대체로 주거지역으로 조성되어 있다. 밀도가 높지 않고 개방성이 매우 높아 보인다.



[그림 4-4] 서울의 토지이용: (a) 준공업지역, (b) 간선도로 인접지역, (c) 녹지 인접지역, (d) 하천 인접지역

#### 건물 형태

아파트는 서울의 대표적인 주거 형태이다. 서울에 아파트가 폭발적으로 증가한 시기는 1962년 이후 정부가 공업화 정책을 추진하면서부터 였다. 서울의 인구가 폭발적으로 증가하면서 주택공급 확충의 필요성이 증대되었다. 늘어나는 인구를 감당하기 위해 정부는 이전까지 대부분 5층 이하였던 아파트의 층수를 10층 이상으로 높여 토지이용률을 제고하면서, 단지의 면적을 여유있게 구성하여 대규모 아파트 단지를 조성하기 시작하였다(서울시정개발연구원, 2001). 그럼에도 불구하고 정부의 경제개발계획으로 서울의 인구밀도가 계속해서 늘어가자, 정부는 행정구역을 두 배로 확대하면서 수평적으로 확장하기 시작하였다. 서울에 인접한 비도시지역이 서울시로 편입되었고, 서울의 도심지인 강남 개발이 본격화되었다. 또한, 1970년대 이후 가용택지가 부족해지고 지가가 상승하면서 10층 이상의 고층아파트가 대규모 단지로 조성되어 건설되기 시작하였다. [그림 4-5]와 같이 획일적인 높이를 가진 일자형 구조의 대규모 아파트 단지가 보편화되었다.



[그림 4-5] 1971~1974년에 건설된 반포1단지 전경 출처: 서울시정개발연구원, 2001

프랑스의 지리학자 발레리 줄레조(Valerie Gelezeau)는 서울을 가리켜 아파트공화국이라고 일컫는다. 아파트 공화국이라는 이름에 걸맞게 서울의 아파트 형태는 획일적인 고층의 대규모 단지에서 탈피하여 점차 다양한 형태의 모습을 갖추기 시작하였다. 아파트의 스카이라인 경관을 고려하여 아파트의 높이를 달리 조성한 아파트가 세워졌다. 스카이라인이 고려된 아파트 단지는 단지 내 어디에서나 하늘을 볼 수 있는 구조를 가졌다(박현찬과 정상혁, 2017). 아파트 단지의 구조를 방사형으로 배치한 단지도 눈에 띈다. 아파트 건물이 넓게 배치되어 개방감이 좋고 아파트 단지가 일방향으로 조성되지 않아 기후나 계절에 따라 변화하는 풍향에 유연한 환기성능을 가질 수 있어 보인다.

한편, 상업 기능이 포함된 건물은 수직으로 높이 솟거나, 건축 면적이 넓은 건물 형태로 조성되어 있다. 주거 중심의 주거와 상업이 혼합된 주상복합 건물은 대부분 저층부에는 상가가 위치하고, 상층부에는 주거용 아파트로 구성된 초고층 형태를 가진다. 건물의 폭이 넓지 않고 수직으로 곧게 뻗어 있어 그늘 효과와 환기성능에 유리하다. 반면 상업 중심의 주상복합 건물은 포디움 형태로 구성된 경우가 많다. 저층부는 넓은 건축면적을 가진 건물로 구성되고 상층부는 저층부 면적의 일부가 높게 솟은 형태를 보인다. 그늘 효과로 인해 건물 주변의 온도를 낮출 수 있으리라 기대되지만 주변에 높은 건물이 밀집해 있다면 환기성능에는 부정적인 영향을 미칠 것이다. 그러나 포디움 건물은 넓은 도로와 인접하고 있어 그로 인한 환기성능이 보전될 수 있다.



[그림 4-6] 서울의 건물 형태: (a) 동별 높이가 다른 아파트 단지, (b) 방사형 구조의 아파트 단지, (c) 주거 중심의 주상복합, (d) 포디움

도시 기후 측면에서 일방향의 획일적인 높이와 구조로 조성된 아파트 단지나 포디움 건물은 바람의 흐름을 막아 환기 성능을 저해할 수 있다. 따라서, 대형 건물이나 건물 블락 설계 시 공기 흐름에 대한 건물의 간섭을 최소화하기 위해 공기 통로(air path)를 고려할 필요가 있다(Ng et al., 2011). 수변이나 산림 인접지역도 마찬가지이다. 건물이 하천의 진행방향과 평행하게 건설될 경우 하천과 같이 개방된 지역에서 불어오는 바람이 아파트 단지 안으로 들어오는 것을 방해할 수 있으며, 산림 인접지역도 산 위에서 불어오는 찬 바람이 도시화 지역에 유입될 수 있도록 건물 사이에 통풍면적이 확보되어야 한다. 도로변에 늘어선 가로수도 바람의 흐름을 막아 인접 지역의 환기성능을 크게 떨어뜨릴 수가 있다. 따라서, 해당 지역의 주 풍향을 식재 설계 단계에서 고려하거나 가로수 식재 방법(복합배치법, 계단식 배치법)을 상황에 맞게 적용할 필요가 있다(서울특별시, 2021).



2011)

## 제 2 절 분석 단위

1. 유효 공간 범위

도시의 기후가 도시 형태의 공간적 특성에 의존하고 있음을 설명하기 위해 유효한 공간 범위에 관한 논의가 필요하다. 일반적으로 기후의 가장 작은 단위인 미기후(microclimate)는 접지기층과 같은 작은 공간에서 수평적 또는 수직적으로 나타나는 기후를 말한다. 접지기층은 지표면 1.5m 아래의 기층으로 생물들의 터전이자 기상 요소들이 지면특성에 민감하게 반응하는 구간을 의미한다(Geiger, 1942). 수평적으로 미기후의 생태적 관점은 미기후와 상관하는 생태 군집의 종류에 의존한다. 즉 경관생태학자는 산이나 사막의 수십에서 수백 킬로미터에 관심이 있으며, 모기의 일생을 연구하는 생태학자는 불과 몇 센티미터에 의미를 둔다(Mislan and Helmuth, 2008). 인간 생태 측면에서 미기후는 인위적으로 개발되어 인간이 정주하는 공간인 도시의 기후로 도시 구조, 피복과 인간의 활동에 의해 구분된 공간 규모를 따른다(Oke et al., 2017).

대기 온도는 에너지 균형을 이루는 경계 부위에서 끊임없이 열을 교환하여 평형상태를 유지한다. 이에 온도 변화가 급격하게 나타나는 경계가 발생하지 않고 공간을 통해 서서히 변화가 나타난다. 그렇기에 공간을 채우고 있는 건물의 형태는 열 평형에 영향을 미치는 주요한 매개체 역할을 하며, 도시의 열 평형이 이루어지는 수평 범위를 결정한다. 일반적으로 온도 평형을 이루는 수평 거리는 도시 기하학 대기 안정성에 따라 반경 200~500m의 범위를 가진다고 알려져 있다(Wiernga 1993; Stewart and Oke, 2012; Oke et al., 2017).<sup>④</sup>

<sup>④</sup> Oke et al.(2017)은 수직 메커니즘에 의해 구분되는 대기 경계층(UBL과 UCL)의 영향을 고려하여 도시에서 발견되는 기후 변동의 공간적 규모를 정리하였다. 이 연구의 구분에 따르면 도시 기후의 공간 규모는 크게 1) Micro, 2) Local, 3) Meso scale로 구분되고, 다시 공간 단위의 도시 형태 특성을 고려하여 세분화된다. Micro scale은 1) Facet (10 x 10m) 2) Element (10 x 10m), 3) Canyon (30 x 200m), Local scale은 block (0.5 x 0.5 km)과 neighborhood/local (2 x 2m), 그리고 Meso scale은 City (25 x 25km)와 Urban region (100 x 100km)로 구분하였다. 로컬 기후의 관점에서 Stewart and Oke (2012)는 UCL 내에서 기후가 수직 도시형태는 UCL의 높이를 결정하므로 온도 평형을 이루는 수평 거리에 영향을 미치는 주요한 인자라고 할 수 있다. 이에 수직 도시형태에 따라 수평 거리가 달라지므로 대기 온도를 정확하게 예측하기 위해서는 유효한 수평 거리를 구하는 것이 무엇보다 중요하다. 하지만 도시형태와 기후가 완벽하게 반응하는 수평 범위를 고려하는 것은 시간이 많이 소요되고 복잡하여 실제 도시계획과 설계 현장에서 활용하기에는 곤란한 측면이 있다. 도시 형태를 집계하는 중심점이 조금만 달라져도 공간을 나타내는 도시형태가 크게 달라질 수 있기 때문이다.

이에 이 연구는 수직 도시형태와 기후의 관계를 살펴보기 위한 수평 공간 범위를 로컬 규모에 해당하는 반경 500m로 설정하였다. 지름 1km는 선행연구에서 제시한 일반적인 도시기하학과 대기 안정성을 고려한 기준을 만족하며, 이 연구가 로컬 규모의 도시형태의 영향에 초점을 두므로 로컬 규모의 다양한 도시 형태를 복합적으로 고려하기에 충분한 면적이다. 또한, 수치적으로 도시계획과 설계 현장에서 적용이 용이하다고 볼 수 있다.

2. 데이터 추출 단위

이 연구는 ALOS 위성자료인 DSM 이미지를 데이터의 최소 단위 기준으로 설정하였다. DSM은 위·경도 1초(이하 30m) 단위로 구성된 데이터로 이 연구에서 사용된 변수 중 유일하게 픽셀단위로 가공되어 배포된 자료이다. 이미 전 처리를 거친 자료이므로 왜곡을 최소화하기 위해 DSM을 기준으로 다른 자료를 집계하였다. 이에 따라 서울시 전체에서 30 x 30m로 792,936개의 그리드가 생성이 되었고, 변수의 속성값이 입력되었다. 생성된 그리드는 서울시 총 1,038개의 S-DoT 측정소를 중심으로 생성된 지름 1km 버퍼 단위내로 취합되어 연구에서 다루는 4Vs와 3Ds 요인의 19개의 변수로 집계되어 연구에 투입되었다.

안정화되는 데 필요한 범위를 반경 200-500m로 제안한다.



[그림 4-8] 버퍼존 샘플 레이아웃

# 제 3 절 Data

#### 1. Measurement data

이 연구의 종속변수인 대기 온도는 서울시에서 측정하고 있는 S-DoT(Smart Seoul Data of Things) 측정 자료를 사용한다. 서울시는 2019년 12월부터 서울시 전역에서 9가지 기상 데이터(온도, 미세먼지, 습도, 조도, 자외선, 소음, 진동, 풍향과 풍속)와 유동인구를 측정하고 있다. 기후 데이터는 2분, 유동인구는 10분 마다 측정되고 있으며, 60분으로 산술 평균한 자료를 2020년 4월 1일부터 제공 중이다. 이 연구는 계절에 따른 영향을 살펴보기 위해 여름에 해당하는 2021년 6월 1일부터 8월 31일까지의 자료와 겨울에 해당하는 2021년 12월 1일부터 2022년 2월 28일까지의 데이터를 추출하여 분석에 사용하였다. 서울시 전역 총 1,064개의 측정 센서에서 측정된 9가지 기상 데이터 중 대기 온도, 상대 습도, 그리고 미세먼지(2.5μm) 농도 데이터를 연구에 사용하였다.

Item	Sensor type	Target	Cycle
Environmental	Basic	Fine dust (µg/m <sup>3</sup> ), Ultra-fine dust (µg/m <sup>3</sup> ), Temperature (°C), Relative humidity (%), Illumination (lux), Ultra- violet (UVI), Noise (dB), vibration (g)	2 minutes
information	Specialized	globe thermometer ( $\mathcal{C}$ )	
	Specialized	Wind direction (°), Wind speed (m/s)	
	Specialized	Visitor count (within 150 m)	10 minutes
출처: 박해경(202	1)		

[표 4-2] S-Do]	[ 측정 정보
---------------	---------


[그림 4-9] S-DoT 센서 외관



[그림 4-10] 설치된 S-DoT



[그림 4-11] 서울시에 설치된 1,058개 S-DoT 측정 센서 위치

서울시 1,064개의 위치에 설치된 고정 관측소에서 시간 단위로 취합된 여름 2,036,279개와 겨울 2,088,439개의 데이터가 취합되었다. 데이터는 시간 경과에 따른 이상치를 판별하여 분석에서 제외하였다. 이상치를 판별하기 위한 방법은 IQR(Interquartile range)<sup>®</sup>을 사용하였다. 이상치로 판별된 데이터는 센서의 오작동으로 온도 분포 내 특정 온도 값을 일정하게 반환하거나 다른 지역과 상당한 차이를 보이는 데이터가 해당된다. 이상치를 제거한 데이터는 여름 2,023,188개와 겨울 2,065,580개이며, 이를 관측소별로 집계하였다. 이상치가 제거된 데이터를 관측소별로 집계한 결과 일부 관측소에서 데이터 공백이 커 계절 온도를 온전히 반영하지 못하였다. 이에 관측소 별로 집계된 데이터는 여름 총 92일과 겨울 90일 중 60일 이상 데이터가 존재하는 관측소만 데이터에 사용하였으며, 이에 총 1,016개의 관측소 데이터가 연구에 투입되었다. 사용된 일별 대기 온도, 상대 습도,

<sup>&</sup>lt;sup>®</sup> IQR은 Interquartile range의 약어로 중앙값을 중심으로 정렬한 사분위수 75% 지점(Q3)의 값과 하위 25% 지점(Q1)의 값의 차이를 의미한다. IQR 방법은 중앙값을 중심으로 Q1과 Q3 의 경계를 넘어가는 이상치를 판별하는 방법이다. 이 연구에서 상한 경계선은 Q3+3\*IQR, 하 한 경계선은 Q1-3\*IQR로 설정하였다.

미세먼지(2.5µm) 농도는 [그림 4-12], [그림 4-13]과 같다.



[그림 4-12] 여름데이터의 이상치 제거 전후 분포. (a) 온도 이상치 제거 전 분포. (b) 온도 이상치 제거 후 분포. (c) 상대습도 이상치 제거 전 분포. (d) 상대습도 이상치 제거 후 분포. (e) PM<sub>2.5</sub> 이상치 제거 전 분포. (f) PM<sub>2.5</sub> 이상치 제거 후 분포



[그림 4-13] 겨울데이터의 이상치 제거 전후 분포. (a) 온도 이상치 제거 전 분포. (b) 온도 이상치 제거 후 분포. (c) 상대습도 이상치 제거 전 분포. (d) 상대습도 이상치 제거 후 분포. (e) PM<sub>2.5</sub> 이상치 제거 전 분포. (f) PM<sub>2.5</sub> 이상치 제거 후 분포

2. GIS data

#### Land cover

토지피복도는 주제도의 일종으로 지구표면 지형지물의 형태를 일정한 과학적 기준에 따라 분류하여 동질의 특성을 지닌 구역을 Color indexing 한 후 지도의 형태로 표현한 공간정도 DB를 말한다. 1985년 유럽환경청(Europe Environment Agency, EEA)에서 추진된 CORINE (Coordination of Information on the Environment) 프로젝트에서 정립된 기준을 기반으로 1998년에 최초로 구축되어, 현재 해상도 30m (축척 1:50,000)의 대분류 raster file, 해상도 5m (축척 1:25,000)의 중분류와 해상도 1m (축척 1:5,000)의 세분류 shape file을 제공하고 있다. 자료는 항공정사영상과 아리랑 위성영상 등의 영상자료를 기반으로 수치지도, 지적도, 정밀임상도 등의 GIS file으로 보완하여 구축하였다. <sup>©</sup>

토지피복도는 평면적인 토지이용 현황을 잘 보여준다. 이 연구에서는 22개 항목으로 구분된 중분류 토지피복도 기준을 중심으로 Residential, commercial, industrial, green(forest and greenery), blue(water) area와 세분류 기준의 road area를 추출하고, Impervious area를 산출하여 사용하였다.

<sup>&</sup>lt;sup>®</sup> 피복분류 : 영상자료를 기준으로 토지피복 경계 및 속성을 분류하고, 분류가 모호한 지역은 참조자료를 활용하여 분류. 토지피복지도 분류항목 및 기준에 따라 중분류 22 개, 세분류 41 개 항목으로 분류하며, 시각적으로 구분이 가능한 것을 분류함.(육안판독법, on screen digitizing). 품질검수 : 토지피복분류 결과물과 영상자료를 비교·검수하여 오류사항에 대해 수정. 기본검수, 기하구조검수, 인접검수, 내용검수 등 4 개 항목 준수 여부를 검수하여 총 3 회 실시. 현지조사 : 영상자료 판독 및 참조자료로 확인이 모호한 지역에 대해 현지에 출장하여 토지피복 현황을 조사·확인. 정확도 평가 : 분류항목별 샘플 수량을 무작위로 추출하여, 토지피복 분류 결과와 기본 영상과의 일치하는 정도를 참조자료 또는 현지조사를 통해 확인.



[그림 4-14] 서울의 토지이용 분류

## Building height

건물 높이 DB는 전국 3차원 지도 구축을 통한 디지털 트윈 구현을 목표로 국토교통부에서 구축하는 GIS 데이터이다. 이 데이터는 지형, 건물, 도로 등의 현실세계를 구성하는 입체적 지형지물의 높이 정보를 GIS 건물 레이어의 속성정보로 제공한다. 현재 건물의 면적 정보가 담긴 GIS 레이어에 건물지반높이와 건물높이를 속성값으로 제공하고 있으며, 건물최고 높이와 건물시설물 최고높이 제공을 목표로 데이터를 고도화하고 있다. [그림 4-15]는 서울 서초구 서초1동을 샘플로 건물의 높이정보를 반영한 GIS 건물 레이어를 보여준다.



[그림 4-15] 건물 높이정보를 반영한 GIS 건물 레이어 예시(e.g. 서초구 서초1동)



<sup>[</sup>그림 4-16] 건물 높이 데이터

## 3. Remote sensing data

## ALOS(Advanced Land Observing Satellite) Global Digital Surface Model

지표면의 높이 데이터는 DSM(Digital Surface Model)을 사용한다. 지표면 위의 건물과 같은 인공 구조물과 식생의 표면 표고를 수치로 기록한 표고 모형을 의미한다. DSM은 지표면 위의 인공 구조물과 식생을 제외한 지형의 표고를 기록한 DEM(Digital Elevation Model)과 구분된다. 즉, 인공위성 센서가 탐지하는 지표면의 첫 번째 반사면 고도를 의미한다.



[그림 4-17] DSM과 DEM 비교 자료: 미국 훔볼트 주립대 GSPP 216 (http://gsp.humboldt.edu/olm\_2015/Courses/GSP\_216\_Online/lesson7-1/applications.html)

DSM 자료를 활용하기 위해 전 세계 30m급 DSM을 제공하는 AW3D30 데이터셋<sup>®</sup>을 활용하였다. AW3D30은 ALOS 위성 영상에서 수집한 30m 급 DSM 데이터 셋으로 ALOS는 DAICHI라는 이름으로 일본 항공우주연구개발기구(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA)에 의해 2006년 1월 발사된 위성이다. ALOS에서 제공하는 30m 급 DSM은 최대 0.5m의 해상도를 제공하는 원본 DSM을 평균값과 중간값 기준으로 30m로 재표집한 데이터이다. 이 연구에서 사용한 데이터는 2021년 1월에 수집된 version 3.1을 사용하였으며, 위도 60도 이내에서 구름과 눈 화소로 인한 공극을 기존 DEM을 통해 보완한 자료이다. 고도 정확도는 1시그마를 기준으로 5m 표준편차를 가지고 있다. 자료는 1도 간격 메시 데이터를 선택한 후 다운로드 받을 수 있으며, 연구에서 활용하기 위해 서울지역을 별도로 추출하였다.

<sup>&</sup>lt;sup>(7)</sup> https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30\_e.htm



[그림 4-18] DSM in Seoul

# 제 4 절 분석 방법

네 가지 수직 도시형태 지표가 도시 기후에 미치는 영향을 살펴보기 위해 이 연구는 두 단계에 걸쳐 분석을 진행하였다. 첫 번째 단계는 수직 도시형태가 대기 온도에 미치는 전반적인 영향력을 확인하는 것이다. 연구에 포함된 1,016개 표본의 도시형태와 대기 온도 간에 나타나는 복잡한 상호작용이 만들어내는 비선형적인 결과를 살펴보기 위해 인공신경망(artificial neural network, ANN)을 사용하여 예측 모형을 생성하였다. 변수의 영향력은 인공신경망의 높은 예측 모형을 기반으로 게임이론에 기반한 SHAP(Shapley Additive exPlanations)을 사용하여 설명을 시도하였다.

두 번째 단계는 도시 형태의 공간 이질성과 대기 온도의 관계를 고려하였다. 도시형태에 따라 나타나는 공간 이질적인 특성은 해당 지역의 온도를 저감하기 위해 각기 다른 전략이 필요함을 의미한다. 이에 표본을 도시형태 특성에 따라 군집화하고, 각 군집에 필요한 온도저감 우선순위를 살펴보았다. 도시형태를 군집화하기 위해 GMM(Gaussian mixture model)을 사용하였고, 각 군집의 SHAP 결과를 통해 해당 군집에 필요한 온도 저감 전략을 논의하였다. 연구의 분석 과정은 [그림 4-19]와 같다.



[그림 4-19] 분석 과정

#### 1. 인공신경망 모형

이 연구는 수직 도시형태가 로컬 기후의 열 균형에 미치는 영향을 도출하기 위해 인공신경망 모형을 사용하여 예측 모델을 구성하였다. 인공신경망 모형은 머신러닝(machine learning) 알고리즘 가운데 가장 널리 사용되는 방법이다. 대용량의 다차원 데이터를 처리하여 뛰어난 예측 성능을 보이며(Dougherty, 1995), 통계적 방법과 같이 엄격한 가정을 필요로 하지 않아 모델이 유연하고, 비선형 데이터를 처리하는 능력이 뛰어나다(Gupta and Lam, 1996). 일반적으로 ANN은 입력 변수의 집합인 입력 레이어(input layer), 모델의 학습 능력을 향상시키는 n개의 은닉층(hidden layer), 그리고 분류 결과를 나타내는 출력 레이어(Output layer)로 이루어져 있다. 은닉층의 개수는 모델이 다루는 특성과 복잡성에 따라 다르다. 은닉층은 연결된 이전 레이어의 출력을 수신하여 가중치 선형 합산으로 변환하여 학습 후 출력하는데, 블랙박스 모델처럼 작동하여 과정을 확인할 수 없다. 이 연구에 적용되는 ANN 모델은 [그림 4-20]과 같다.



[그림 4-20] 인공신경망 모형 개념도

인공신경망은 생물의 신경망을 모방하여 n개의 입력 노드 (x<sub>1</sub>,x<sub>2</sub>,x<sub>3</sub>,…,x<sub>n</sub>)가 은닉층을 통과하면서 출력 노드로 반환되는 모형을 말한다. 입력 노드는 j개의 노드를 가진 두 개의 은닉층(hidden layer)을 통과하며 입력 노드와 은닉 노드의 연결 강도를 의미하는 가중치가 곱하여 진다. 처음에 임의의 값으로 주어진 가중치는 역전파 학습 프로세스(backward propagation learning process)에 의해 최적 값으로 결정된다. 가중치가 곱해진 입력값의 합(가중입력합)은 특정 임계값을 초과할 때 신호를 출력하는데, 가중입력합의 크기를 임계값과 비교하는 합수를 활성화 함수(Activation function)라고 한다. 활성화 함수에는 Step, Sigmoid, Hyperbolic tangent 및 ReLU(Rectified Linear Unit)가 주로 사용된다.

$$h_{j(k)} = f_{h_{j(k)}} \left( \sum_{i(j)=1}^{n(j)} x_{i(j)} w_{ij(jk)} + \theta_{j(k)} \right)$$
$$O_{AT} = f_l \left( \sum_l x_k w_{kl} + \theta_l \right)$$

$$f_{h_{j(k)}} = \begin{cases} h_{j(k)} & for & h_{j(k)} \ge 0\\ 0 & for & h_{j(k)} < 0 \end{cases}$$
$$f_{l} = \begin{cases} l & for & l \ge 0\\ 0 & for & l < 0 \end{cases}$$

x<sub>i</sub>는 i개의 노드를 가진 입력층, h<sub>j(k)</sub>는 j와 k개의 노드를 가진 두 개의 은닉층, O<sub>AT</sub>는 출력층을 의미한다. w<sub>ij</sub>는 출력층과 h<sub>j</sub>, w<sub>jk</sub>는 h<sub>j</sub>와 h<sub>k</sub>, w<sub>kl</sub>은 h<sub>k</sub>와 연결 가중치이며, θ<sub>j(k)</sub>는 j와 k의 은닉층, θ<sub>l</sub>는 출력층에서 발생하는 바이어스이다. f<sub>h<sub>j(k)</sub>와 f<sub>l</sub>는 이 연구에서 사용된 활성화 함수인 ReLU의 산출식이다. ReLU는 전통적인 활성화 함수인 sigmoid와 Hyperbolic tangent에서 발생하는 기울기 소실 문제(Vanishing gradient problem)를 해결한 활성화 함수이다(Nair and Hinton, 2010). 기울기 소실 문제는 각각 0에서 1, -1에서 1 사이의 범위를 갖는 sigmoid와 Hyperbolic tangent가 모델에 적용되는 경우 함수가 가질 수 있는 값의 범위가 작아 출력의 변화가 매우 작은 경우 층이 증가할수록 기울기가 0에 수렴하는 문제를 말한다. 이 경우 가중치를 효율적으로 추정할 수 없어 성능이 크게 저하되며, ReLU는 0에서 무한대 사이에서 움직여 이 문제를 해결하였다(Maas et al., 2013).</sub>



[그림 4-21] 신경망 모델의 활성화 함수(Golshani et al., 2018)

ANN 모델은 Python에 기반한 딥러닝 프레임워크인 PyTorch에서 구현되었다. PyTorch는 페이스북(Facebook)에서 개발한 Torch를 기반으로 하는 프레임워크로 오픈 소스로 제공된다. Torch는 다차원 텐서®에 대한 데이터 구조를 처리하는 수학적 함수를 제공하는 패키지이며, 가속화 하드웨어 사용에 최적화되어 딥러닝 연구에 적합한 구조를 가진다. 이에 이 연구는 PyTorch에 기반하여 다중레이어 인공신경망 모델을 구성하였다. ANN 시스템은 AMD Ryzen 9 5900HX CPU와 NVIDIA GEFORCE RTX 3050 Ti GPU 환경에서 구현되었다.

## 2. ANN 모형 성능 검증

모델의 성능은 관측치와 예측치의 비교를 통해 검증한다. 모델 검증을 위해 세가지 측정 방법을 사용하였다. 측정 방법은 평균 절대 편차(mean absolute deviation, MAD), 평균 절대 퍼센트 오차(mean absolute percentage error, MAPE), 그리고 평균 제곱근 오차(root mean squared errors, RMSE)이다. MAD는 예측 값과 관측 값의 차이의 절대값을 평균화하여 예측의 정확도를 측정한다. 샘플과 동일한 단위의 오차를 측정할 때 주로 사용된다(Moon and Yao, 2011) MAPE는 예측 값과 관측 값 사이의 절대 오차를 관찰 값으로 나누고, 해당 고정 백분율을 평균화한다. 샘플 크기가 중요할 때 유용하다(McKenzie, 2011). RMSE는 오차의 제곱합을 산술평균한 값의 제곱근이다. 기후 연구에서 모델 성능을 측정하기 위해 널리 사용되며, 절대값이 작은 오류보다 절대값이 큰 오류에 더 많은 가중치를 부여하므로 분산에 페널티를 부여하는 경향이 있지만 오차 분포가 가우스 분포이고 표본이 충분하다면 이점이 있다고 알려져 있다(Chai and Draxler, 2014).

<sup>&</sup>lt;sup>®</sup> 텐서(tensor)는 배열(array)나 행렬(matrix)와 유사한 구조로 PyTorch에서 모델의 입력, 출력, 매개변수의 구조를 의미한다. Python의 수학적 연산 구조로 널리 알려 진 Numpy는 GPU를 사용하여 수치 연산을 가속화할 수 없는 반면, 텐서는 GPU나 다른 하드웨어 가속기에서 실행할 수 있어 딥러닝 연산에 적합하다.

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| \overline{y}_i - y_i \right|$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{y_i - \overline{y}_i}{y_i} \times 100$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (y_i - \overline{y}_i)^2}{N}}$$

## 3. 변수 영향력 도출

ANN 예측 모형을 구성하는 변수의 영향력은 SHAP(Shapley Additive exPlanations)를 사용하여 설명하였다. ANN과 같은 대부분의 기계학습 혹은 딥러닝 모형은 대상을 정확하게 예측하는데 관심이 있다. 그렇기에 예측 정확도를 향상시키는 것이 예측 모형의 주된 관심사였으며, 예측 성능과 일종의 트레이드 오프 관계로 알려져 있는 결과 도출 과정의 중요성은 그동안 간과되어 왔다(Došilović et al., 2018). 그러나 최근 연구는 기계학습 혹은 딥러닝 모형의 결과 도출 과정에서 일어나는 불투명성을 개선하여 모형에 대한 이해를 높이면 모형의 성능을 질적으로 향상시킬 수 있다고 제언한다. 블랙박스라고 불리는 모형 내부에 대한 이해는 의사결정의 공정성(impartiality)을 보장하고, 모형의 강건성(robustness)을 개선하며, 변수 간의 인과관계(causality)를 드러내어 모형의 타당성을 높인다(Arrieta et al., 2020).

이 논문에서 모형의 해석을 위해 사용하는 SHAP는 수학적 방법에 기반한 해석 도구이다. SHAP는 게임이론의 개념을 기반으로 예측 모형을 구성하는 요소<sup>®</sup>의 중요도를 판별하여 예측하려는 대상에 미치는 기여도를 산출한다(Lundberg and Lee, 2017). SHAP가 사용하는 기여도 산출식은 1951년 Lloyd Shapley가 소개한 게임 이론의 수학적 개념인 Sharpley 값을 사용하였다. Sharpley 값은 협동 게임 이론(Coalitional game theory)의 한

<sup>&</sup>lt;sup>®</sup> 예측 모형의 구성요소는 표 형식의 데이터 집합, 이미지의 픽셀 집합, 또는 텍스트 문서의 단어를 의미한다.

방법으로 연합(Coalition)의 구성요소 간에 연합의 산출물을 할당하는 방법을 알려준다. 예측 인자의 기여도를 공정하게 평가하기 위해 연합의 모든 순열(Permutation)을 생성하고, 각 순열에서 개별 기여도를 계산한 다음 기여도의 평균을 취하는 방식이다.

Shapley 값과 SHAP 산출식은 다음을 따른다(Lundberg and Lee, 2017; Lundberg et al., 2018). M개의 변수가 있는 F 집합과 F의 부분 집합인 연합 S가 있다( S⊆F ). 예를 들어, M=3인 경우 S의 집합은 {φ,{1},{2},{3},{1,2},{1,3},{2,3}.{1,2,3} 이다. 이때, 변수 i의 기여도(φ<sub>i</sub>)는 i가 추가된 연합 S의 값(fsu(i))과 i가 추가되기 전 연합 S의 값의 차이에서 산출할 수 있다. M=3인 S의 집합에서 {3}의 기여도 f<sub>SU{3}</sub>는 f<sub>SU{1,2,3</sub>}에서 f<sub>SU{1,2}</sub>의 차이를 의미한다. 그런데 순열의 기여도는 순열의 순서에 따라 변경될 수 있다. {1,2,3}과 {3,2,1}이 같은 집합으로 이뤄져 있지만 기여도가 달리 나타날 수 있으므로 모든 순열에 대한 개별 기여도를 구한 후 평균을 구하여 최종 기여도를 산출하게 된다. 즉, M=3인 집합은 {1,2,3}, {1,3,2}, {2,1,3}, {2,3,1}, {3,1,2}, {3,2,1}의 순서로 배열될 수 있고, 각 집합의 순열에서 {3}의 기여도를 산출한 후 평균하여 최종 기여도가 결정된다. 예컨대, 세 번째 순열에서 {3}의 기여도  $f_{SU{3}} = f_{SU{2,1,3}} - f_{SU{2,1}}$ 이고, 다섯 번째 순열에서  $\{3\}$ 의 기여도  $f_{SU\{3\}} = f_{SU\{3\}} - f_{SU\{\phi\}}$ 를 의미한다.

위의 식을 정리하면, 변수 i의 총 기여도는 모든 순열에서 계산된 값의 합으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$|S|! (|M| - |S| - 1)! (f_{S \cup \{i\}} - (f_S))$$
 for each  $S \subseteq M - \{i\}$ 

여기에서 |*M*|와 |*S*|는 F와 S의 각 구성요소 수이고 (|*F*| - |*S*| - 1)는 F에서 S와 i를 제외한 나머지 구성요소 수를 의미한다. 이제 i의 Shapley 값  $\phi_i$ 를 구하기 위해 |*M*|!으로 나누어 주어 평균 기여도를 산출한다. 최종 기여도 산출식은 아래와 같다.

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq M - \{i\}} \frac{|S|! (|F| - |S| - 1)! (f_{S \cup \{i\}} - (f_S))}{|M|!} (f_{S \cup \{i\}} - f_S)$$

SHAP는 예측 모형에서 변수의 영향과 중요도를 평가하여 블랙박스

모형의 설명을 가능하게 하는 중요한 기여를 하였다. SHAP는 우수한 예측 정확도를 가짐에도 불구하고 적용하는 데 제한이 있었던 기계학습과 딥러닝 접근 방식의 사용 분야를 확장하였다. Lundberg et al.(2018)는 전신마취 중 실시간으로 저산소혈증의 위험도를 예측하고 위험요인을 설명해주는 머신러닝 기반 시스템에 SHAP를 적용하였다. SHAP을 이용하여 수정 가능한 요소를 찾아내어 예측 정확도를 약 두 배 가량 향상시킬 수 있었다.



[그림 4-22] TreeExplainer 기반 로컬 해석(local interpretation) 과정(Lundberg et al., 2020): a, 각 입력 변수 크레딧의 수치 측정 할당(assigning a numeric measure of credit)에 기반한 로컬 해석 과정. b, 입력 변수의 로컬 해석을 결합하여 전역 해석, 상호작용 효과, 기능 의존성을 도출

SHAP는 모형의 로컬 효과를 측정하는 방법으로 최근 많은 주목을 받고 있다. 기존의 해석모델은 입력 데이터가 모델에 미치는 영향의 전역적인 영향을 해석(global interpretation)하는 데 관심을 두었다면(Lundberg and Lee, 2017), SHAP의 로컬 해석(local interpretation)은 개별 예측에 대한 입력 특성의 영향을 살펴보기 위한 목적으로 개발되었다. SHAP의 장점 중 하나는 기능 의존성(feature dependence) 결과에 대한 설명이 가능하다는 점이다. 기능 의존성은 비선형 패턴을 식별하여 해당 입력 변수가 모든 샘플의 예측에 대해 얼마나 영향을 미쳤는지 보여준다. 또한, 입력 변수 간의 상호작용 결과를 보다 자세히 설명한다(Lundgerg et al., 2020).

Lundberg et al. (2020)은 SHAP를 사용하여 비선형 패턴을 보이는 입력 변수가 샘플의 예측에 어떻게 영향을 미쳤는지 설명하였다. 설명을 위한 자료는 미국 CDC(Centers for Disease Control and Prevention)의 NHANES(National Health and Nutrition Examination Survey)에서 20년간 축적한 14,407명의 사망률 데이터를 활용하였으며, SHAP 기능의 타당성을 보여주었다. SHAP는 연령, 성별, 수축기 혈압(Systolic Blood Pressure) 등이 사망 위험에 미치는 영향에 대한 의미 있는 정보를 제공하였다. 특히, 기능 의존성 플랏(Feature dependence plot)은 기존에 알려진 사망 위험에 대한 수축기 혈압의 변곡점(120 mmHg와 140 mmHg 사이)을 재현하였으며, SHAP value 분산의 비선형 패턴은 연령대 구분을 통해 사망 위험에 미치는 조기 발병 고혈압의 중요성을 분명하게 보여주었다.



[그림 4-23] 사망 위험에 대한 수축기 혈압의 SHAP value 그래프(Lundberg et al., 2020)

SHAP value의 분산에서 나타나는 변수 간의 상호 관계는 전통적인 통계 방법에서는 식별하기 어려웠던 데이터에 숨겨진 의미를 드러낸다. 전통적인 통계 방법은 복잡한 이론 기반의 접근을 피하고 데이터를 중심으로 표본을 설명하는 경험적 분석 방법이다. 몇 가지 수학적 가정에 의존하여 종속 변수를 설명하는 최적의 추정량을 찾는 것이 목표이다. 예컨대, 대표적인 가우스-마르코프 정리는 선형 회귀모형의 오차가 서로 상관하지 않고, 오차의 분산이 일정하며, 설명변수가 외생변수일 때 OLS(Ordinary least squares) 방법을 통해 BLUE(Best Linear Unbiased Estimation), 즉 선형(linear)이고 불 편향된(unbiased) 추정량 중 가장 효율적인 추정량을 찾을 수 있다고 정의한다(Henderson, 1975).

문제는 설명 변수의 수가 적고 표본 크기가 큰 경우에는 BLUE를 추정하는 것이 문제가 없지만 고차원 데이터에서는 BLUE를 추정하기 위한 가정을 만족하기 어렵다. 또한, 고차원 데이터에서 변수 간의 상호 관계 및 상호 작용에 의한 효과를 살펴보는 것은 도전적인 문제이다(Samek et al., 2021). 이에 이 연구는 10개의 수직과 수평 도시형태 변수 간에 나타나는 상관관계를 식별하기 위해 SHAP 방법을 사용하였다. ANN 모형은 Pytorch를 기반으로 작성되었으며 SHAP 해석은 KernelExplainer를 적용하였다.

#### 4. 도시형태 군집

도시의 기하학적 패턴은 머신러닝 방법인 군집분석을 통하여 살펴보았다. 군집분석은 비지도 학습(Unsupervised learning)의 하나로 라벨링이 되지 않은 데이터 내에서 비슷한 패턴을 갖는 몇 가지 하위 그룹을 식별한다(Jain, 2010.). 비지도 학습으로 잘 알려진 방법에는 군집방법에는 K-means, HCA(Hierarchical clustering analysis), DBSCAN(density-based spatial clustering of applications with noise), GMM(Gaussian mixture model)가 있다. 유클리드 거리 기반으로 집단을 분류하는 방법이 대표적이다. 예컨대, K-means는 초기 설정된 몇 개의 중심점을 시작으로 가까이에 위치한 자료를 동일한 그룹으로 묶는 방식으로 군집을 이룬다. 계산이 복잡하지 않아 적용이 쉬우면서도 데이터를 잘 분류하여 널리 사용되지만 초기 설정되는 중심점에 의해 편향될 우려가 있고, 데이터 간 거리로만 특성을 구분하여 이상치에 취약하다는 단점이 지적된다.

이 연구는 도시의 기하학적 패턴을 확인하기 위해 GMM을 활용하였다. GMM은 분포가 알려지지 않는 데이터를 유한한 개수의 가우시안(Gaussian) 분포로 군집화하여 설명하는 확률론적 모델이다. GMM은 데이터 분포가 특정 군집에 속하지 않고 확률론적 분포의 형태로 다른 군집에 속할 수 있어

79

유연하다는 장점이 있다(Ma et al., 2022). K-means와는 달리 제곱 유클리드 거리에만 의존하지 않아 크기가 다른 클러스터에 민감하게 반응하고(Jochem et al., 2021), 복잡한 비선형 관계를 잘 식별한다(Di et al., 2022).

GMM은 군집의 개수를 사용자가 직접 지정해야 한다. GMM는 BIC(Bayesian Information Criterion)을 사용하여 군집 개수를 평가하는 것이 일반적이다(Schwarz, 1978). BIC는 우도함수를 사용하여 변수 증감에 따라 발생하는 Bias와 Variance 간의 최적 모형을 선택하는 방법이다. 산출식과 같이 모형 적합도인 최대화된 Log-Likelihood에 추가된 변수를 페널티로 부과하여 최적의 모형을 선정한다. 따라서, BIC 값이 낮을수록 입력 데이터의 분포에 대해 더 나은 성능을 의미한다(Wit, Heuvel, and Romeijn 2012)

BIC = -2LogLikelihood + log(n) p

GMM은 주어진 데이터셋 X = {x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, ..., x<sub>n</sub>}이 k개의 정규분포에 의해서 생성되었을 때, x<sub>n</sub>가 속한 분포를 찾는 확률을 의미한다. 다음과 같이 확률밀도함수의 합으로 표현할 수 있다(Y. Li et al., 2018).

$$p(X) = \sum_{k=1}^{K} \pi_k N(X|\mu_k, \sum_k)$$

$$\pi_k = \Pr(\mathbf{Z} = \mathbf{k})$$
$$0 \le \pi_k \le 1, \sum_{k=1}^K \pi_k = 1$$

$$N(X|\mu_k, \Sigma_k) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu_k)^T \Sigma_k^{-1}(x - \mu_k)\right)}{\sqrt{(2\pi)^D det \Sigma_k}}$$

π<sub>k</sub>는 혼합 계수로 k번째 분포가 선택될 확률을 나타낸다. 혼합계수는
 z라는 잠재변수를 사용하여 표현하며, 잠재변수 z는 관측변수 x<sub>n</sub>이 생성될
 확률을 의미한다. 예컨대, Pr(Z = 1)은 관측변수 x<sub>n</sub>가 첫 번째 분포에 의해

생성될 확률을 의미한다.  $\mu_k$ 와  $\sum_k$ 는 k번째 분포의 평균과 공분산 행렬을 의미하며, N(X| $\mu_k$ , $\sum_k$ )은 가우시안 확률 밀도 함수(Gaussian probability density function)이다. 즉, GMM은  $\pi_k$ , $\mu_k$ 와  $\sum_k$ 를 추정하여 BIC 방법으로 지정된 k에 따라 군집을 분류한다.

5. GMM 성능 검증

분류된 군집은 변수 특성에 따라 군집 간 차이가 발생하지 않을 수 있다. 군집 간 차이 해석에 유의하기 위해 도시형태 변수별로 분류 성능을 검증하였다. 먼저 정규성 검정(샤피로-윌크 검정)을 수행하여 정규성을 만족할 경우 아노바 검정, 정규성 가정을 위배하면 비모수 대안인 크루스칼-왈리스 검정을 실시하였다. 사후 검정은 각각 터키 검증과 던 검정을 실시하였다. 사후 검정 결과는 부록 I.에서 확인 가능하다.

# 제 5 절 연구 변수

변수는 크게 도시 형태 요인과 기상 요인으로 구분되며, 도시 형태 요인은 다시 수직 도시 형태, 수평 도시 형태, 공간 도시 형태 요인으로 세분화된다. 기상 요인에 속한 상대습도와 미세먼지 농도 변수는 통제 변수로 포함되었다. 상대습도와 미세먼지 농도는 대기 중 단파 복사를 흡수하여 저장하고, 장파복사를 방출하여 대기 온도에 영향을 미치는 주요한 변수로 알려져 있다.

## 1. 종속변수

이 연구의 종속변수는 현장에서 측정된 대기 온도 지표를 사용하였다. 대기 온도는 서울시 1,016개 지점에서 고정된 관측소에서 시간 단위로 측정되었다. 서울시는 측정된 데이터를 일주일 주기로 서울 열린데이터광장에서 스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT) 환경 정보(https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-15969/S/1/datasetView.do) 카테고리로 제공하고 있다. 고정된 데이터는 측정 지점이 적거나 연구자가 원하는 특정 위치에서 데이터를 수집할 수 없다는 단점이 있지만(Ho et al., 2014), 긴 시간동안 주기적인 데이터를 수집할 수 있고 공공 기관에서 공식 채널을 통해 제공한다는 점에서 양질의 데이터에 쉽게 접근할 수 있다는 장점이 있다(Yao et al., 2015).

이 연구는 계절에 따른 영향을 살펴보기 위해 여름에 해당하는 2021년 6월 1일부터 8월 31일까지의 자료와 겨울에 해당하는 2021년 12월 1일부터 2022년 2월 28일까지의 데이터를 추출하여 분석에 사용하였다. 대기 온도 데이터는 이상치를 제거<sup>®</sup>하면서 공백이 발생해 시간 불 연속성이 발생하여 시계열 데이터로 활용하기에 적절하지 않았다. 이에 관측소별 평균 온도를 산출하여 모형에 투입하였다.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> 이상치를 제거 과정은 제4장 방법론 제3절 데이터에서 자세하게 다루었다.

#### 2. 설명변수: 수직 도시형태

수직 도시 형태는 4Vs(Vertical, Variance, Volume, Vacant)를 기반으로 선택되었다. 선택된 변수는 선행연구에서 로컬 규모의 수직 도시형태를 측정하기 위해 사용된 변수이다. 고려된 전체 변수 목록은 [표 4-3]과 같으며, 최종 선정된 변수는 [표 4-4]와 같다.

#### Vertical

Vertical은 도시 내 자연 및 인공 구조물에 의해 형성된 높이를 의미한다. Vertical은 평균 높이(Huang and Wang, 2019), Elevation factor(Equere et al., 2021), 가중평균높이(Weighted average height)(Qin et al., 2015), DSM(Digital surface model)(Tian et al., 2019)을 통해 측정되었다.

높이에 의해 영향을 받는 그늘 효과, 열 용량, 환기성능은 건물 뿐만 아니라 나무와 같은 자연 식생에 의한 효과도 고려해야 한다. 자연 식생의 높이를 고려하기 위해 ALOS(Advanced Land Observing Satellite) 위성영상에서 수집한 DSM 리모트 센싱 이미지를 활용하였다. DSM은 위·경도 1초(이하 30m) 단위로 구성된 데이터로 전체 데이터의 정합성을 위해 DSM 데이터를 기준으로 공간 단위를 설정하였다. DSM은 지표면의 높이를 포함한 데이터이므로 해당 범위의 절대 높이를 의미한다. 지붕 높이에서 형성되는 UCL의 특성을 고려하면 지표 높이를 배제한 구조물의 상대 높이를 반영할 필요가 있다. 이에 DSM에서 지표면 높이에 해당하는 DEM을 뺀 값을 DSM 상대 높이로 반영하였다.

건물의 높이는 국토교통부에서 구축한 GIS 건물 높이 데이터를 사용하여 지표면의 높이에 따른 절대 및 상대 높이를 이용하였다. 폴리곤으로 구성된 GIS 데이터를 DSM의 공간단위와 일치하도록 30 x 30m 단위의 총 792,936개의 픽셀에서 계산하였다. 단, 픽셀의 평균 높이는 픽셀에 포함된 건물 높이에 면적가중법을 적용하여 픽셀의 평균 높이를 계산하는 가중 평균 높이(Weighted average height)를 선택하였다(Qin et al., 2015). 건물의 가중 평균 높이(Weighted average height of building, WAHB)는 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$WAHB = \frac{\sum_{i=1}^{N} A_i h_i}{\sum_{i=1}^{N} A_i}$$

*A<sub>i</sub>*와 *h<sub>i</sub>*는 각각 i 건물의 건축 면적과 건물의 높이; N은 셀 안에 포함된 건물의 개수를 의미한다.

#### Variance

Variance는 건물 높이의 변위를 나타낸다. 선행연구는 높이 변위(Height variance)(Huang and Wang, 2019), 상대적주름(Rugosity)(Adolphe, 2001), 거칠기 길이(Roughness)(Macdonald et al., 1998)를 통해 건물 높이 변위를 측정하였다.

Variance는 로컬 규모에서 해당 범위의 평균 높이와 비교하여 건물 높이의 높이 차이가 얼마나 되는지를 나타낸다. Adolphe(2001)는 바람 분포(wind profile)에 대한 도시 형태를 고려하면서 캐노피 높이의 편차에 바람 방향의 횡단면 길이를 고려하는 상대적 주름 지표를 제안하였다. 캐노피 높이의 편차는 로컬 규모의 건물 평균 높이로부터의 오차의 합을 계산하되 평균 높이보다 작아 음수가 나오는 경우를 고려하여 제곱한 뒤 다시 제곱근을 도출하여 합산한다.

도시형태의 바람 분포에 대한 영향을 거론할 때 오래도록 주 풍향을 고려하는 것이 중요한 문제로 제기되었다. 그러나 Kanda et al. (2013)는 주 풍향과 주 풍향을 제외한 다른 모든 방향의 평균을 구하여 비교한 결과가 거의 차이가 없음을 보고한다. 이에 픽셀 단위에서 취합한 가중평균높이와 픽셀의 단면 길이를 바람 방향의 횡단면 길이로 적용하는 것이 결과에 미치는 영향은 미미할 것이다. Variance를 계산하는 식은 아래와 같다.

$$Variance = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^{N} (WAHB_i - Avg. WAHB_{buffer})^2 \times l_i^2)}}{\sum_{i=1}^{N} l_i}$$

 WAHB<sub>i</sub>는 i 셀의 WAHB; Avg.WAHB<sub>buffer</sub>는 연구의 단위인 반경 500m

 내 건물 높이의 평균; N은 반경 500m 버퍼 내 셀의 개수; l<sub>i</sub>는 i 건물의

 폭을 의미한다.

#### Volume

체적은 3D 도시형태를 표현하는 가장 직접적인 형태로 건물이 공간을 얼마나 차지하는지 나타내는 가장 단순한 형태의 변수이다. 선행연구는 건물 체적(Li et al. 2020), 용적률(Floor area ratio)(Yoshida and Omae, 2005; Lin et al., 2017), 도시 압축성(Urban compactness)(Yoshida and Omae, 2005; Edussuriya et al. 2011)을 사용하여 측정하였다.

연구의 대상 범위가 같다면 체적의 합은 공간을 차지하는 건물의 밀도로 표현될 수 있다(Li et al, 2020). 이 연구는 건축 면적과 건물 높이 GIS 데이터를 이용할 수 있으므로 데이터에 기반하여 건물 체적에 대한 정확한 값을 산출할 수 있다. 체적은 개별 건물의 체적을 그리드로 나뉜 건축면적과 건물 높이를 곱하여 산출하고, 로컬 규모에서 건물 체적을 더하여 사용하였다. 로컬 규모의 면적이 일정하므로 면적이 통제된 상황 속에서 건물이 공간을 얼마나 채우고 있는지 가늠할 수 있다. 계산식은 아래와 같다(modified based on Li et al. 2020).

$$Volume = \sum_{i=1}^{N} (BD_{area,i} \times BD_{height,i})$$

 BD<sub>area,i</sub> 는 i셀의 건축 면적; BD<sub>height,i</sub> 는 i셀의 건물 높이; N은 반경

 500m 버퍼 내 셀의 개수를 의미한다.

#### Vacant

공간의 개방성을 나타내는 지표인 Vacant는 공극률(Porosity)(Adolphe, 2001), 천공률(Sky view factor, SVF)(Chun and Guldman, 2014; Yan et al., 2014), 종횡비(Aspect ratio)(Silva et al., 2018; Jamei et al., 2015)이 사용되었다. 이 연구에서는 도시의 공극률(Porosity)을 연구에 투입하였다.

공극률은 도시와 같이 단단한 골격을 가진 다공성 매질에서의 공기 흐름을 의미한다(Adolphe, 2001). 공극률은 UCL 내부를 흐르는 바람의 양과 관계가 있으므로 표면에 저장된 열을 대기로 방출하는 열 이류 효과와 환기성능과 관련이 있다(Silva et al., 2018). 이에 UCL 내부에 흐르는 바람의 양을 계산하기 위해 공극률 측정의 기준이 되는 공간높이를 지역의 가중평균높이로 하여 그 이하 공간의 건물이 없는 오픈스페이스를 산출하였다. 건물이 없는 구멍(Holes)의 체적을 측정한 것으로 냉각 효과를 발생시키는 식생과 수 공간도 도시 공간의 열린 공간으로 적용하였다(Huang et al., 2007). 계산식은 다음과 같다.

$$Vacant = \frac{open \ volume}{total \ volume} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \{A_i \times (WAHB_i - Avg. WAHB_{buffer})\}}{\sum_{i=1}^{N} (A_i \times Avg. WAHB_{buffer})}$$

A<sub>i</sub>는 i 건물의 건축 면적; WAHB<sub>i</sub>는 i 셀의 WAHB; Avg.WAHB<sub>buffer</sub>는 연구의 단위인 반경 500m 내 건물 높이의 평균; N은 반경 500m 버퍼 내 셀의 개수를 의미한다.

#### 3. 통제 변수: 수평 도시형태

도시의 수평적 도시형태는 토지이용과 통행의 관계를 통해 풍부하게 논의되었다. 도시의 토지이용을 변경하여 자동차 이용이 보편화되면서 높아진 도시의 통행수요를 완화하는 방안을 찾는 것이 주된 목표였다. 통행 연구는 알파벳 D로 시작하는 단어를 사용하여 이를 개념화하였다(Ewing and Cervero, 2010). D변수는 Cervero와 Kockelman (1997)과 개발한 세 가지 D변수들(density, diversity, and design)과 목적지 접근성(destination accessibility), 통행수단까지의 거리(distance to transit)(Ewing and Cervero, 2001) 등의 변수가 추가되어 현재 6 혹은 7Ds가 사용된다(Ewing and Cervero, 2010). 이 연구는 이중 대기 온도에 영향을 미치는 도시형태의 수평적인 측면을 통제하기 위해 Density, Diversity, Design의 세가지 변수를 연구에 사용하였다.

#### Density

밀도 변수는 관심 대상의 건축 면적(Heiden et al., 2012), 불투수면적(Silva et al., 2018); 프랙탈 차원(Fractal dimension)(Hermosilla et al., 2014)이 주로 이용되었다. 이 연구는 건축 면적을 나타내는 주거 및 상업지역 면적의 비율과 건축면적에 도로 면적을 포함하여 인위적으로 개발된 면적의 총합인 불투수면적 비율을 변수로 사용하였다.

$$Density_{BD} = \sum_{i=1}^{N} (Area_{Residential} + Area_{Commercial})$$
$$Density_{Imper} = \sum_{i=1}^{N} Total Area_{Impermeability}$$

Area<sub>Residential</sub> 은 주거지역 면적; Area<sub>Commercial</sub> 은 상업지역 면적; Total Area<sub>Impermeability</sub>는 총 불투수지역 면적; N은 표본 크기를 의미한다.

Variety

다양성 변수는 대상 지역의 토지가 얼마나 다양하게 이용되는지를 측정한다. 보통 엔트로피를 측정하여 반영하며, 이 연구에서는 Shannon의 다양성 지수를 사용하였다(Cervero, 2002). Shannon의 다양성 지수는 토지이용의 풍부함(richness)과 이용 균등성(evenness)을 측정한다(Cervero, 2002). 연구에서 중요하게 다루는 변수를 고려하여 여섯 가지 토지이용(주거, 산업, 공업, 도로, 녹지, 하천)의 분포와 비율을 계산하였다. 값이 높을수록 토지이용이 비례적으로 고르게 분포되어 있음을 의미한다.

$$Diversity_{Shannon} = \left\{-\sum_{i=1}^{N} p_i \ln(p_i)\right\} / \ln(k)$$

*p<sub>i</sub>*는 토지이용 면적 비율, k는 계산에 사용된 토지이용의 개수; N은 표본 크기를 의미한다.

또한, 이 연구는 열 교환 측면에서 녹지와 하천의 중요한 역할을 고려하기 위해 녹지와 하천 면적을 다양성 변수로 이용하였다. 녹지는 산림, 도시 숲, 공원, 가로수, 개인 정원, 옥상 및 벽면 녹화의 형태, 수 공간은 자연 및 인공 하천으로 도시에 존재한다. Gunawardena et al. (2017)은 도시의 녹지와 하천이 제공하는 다양한 생태계 서비스에서 지역의 열 이벤트를 완화하는 환경적 자산(environmental capital)에 초점을 두고 리뷰 연구를 진행하였다. 연구에 따르면 녹지는 복사열 흡수, 반사 효과를 통해 공간의 순복사열을 저감한다. 또한, 녹지의 증산작용은 주변 지역의 온도를 낮추는 경향이 있으며, 일정 규모 이상에서는 그림자 효과보다 더 우세한 효과를 나타내기도 한다. 수 공간도 내재적으로 현열을 잠열로 바꾸어 지역의 온도를 낮추고, 주변 기후와 상호작용하여 유익을 극대화한다. 물은 열용량이 크고 잠열에 소비되는 열이 많아 여름철 물의 표면 온도(26.2 °C)는 아스팔트(46.2 °C)와 회색 대리석(42.8 °C) 포장에 비해 훨씬 낮게 나타난다(Chatzidimitriou and Yannas, 2015). 또한, 건조한 지역에서 물이 더 잘 증발하고, 물의 깊이와 상태(흐르는지 고여 있는지)에 따른 효과가 달리 나타난다. 잎과 가지가 무성한 나무가 바람의 흐름을 방해하여 환기 성능을 저해하거나 수 공간 근처에 나무가 있으면 야간에 대기 온도가 강해지는 경우가 발견되기도 하지만 대체적으로 녹지와 수 공간에 의한 열 환경 완화 효과가 큰 것으로 나타난다.

$$Diversity_{Green} = \sum_{i=1}^{N} Area_{green}$$

$$Diversity_{Blue} = \sum_{i=1}^{N} Area_{Blue}$$

Area<sub>Green</sub> 은 녹지 면적; Area<sub>Blue</sub> 는 수공간 면적; N은 표본 크기를 의미한다.

#### Design

디자인은 대상지의 네트워크 특성을 의미한다. 도로가 얼마나 잘 연결되어 있는지를 가늠하는 변수로 도로 연장, 면적 혹은 교차로 수를 변수로 이용한다. 이 연구는 도로 면적비율을 대리 변수로 사용하였다.

$$Design_{Road} = \sum_{i=1}^{N} Area_{Road}$$

기는데 미소(ㅋ 10-1 . പ . 1 11.1 ---1

[표 4-3] 기본 연구에서 사용된 노시영태 면수(도결 규모)				
노시형태 변수	산술식 옥은 설명	술저		
Vertical				
Mean height (MH)	Mean building height in a block	Huang and Wang (2019)		
Elevation factor (EF)	High-resolution 3D images from Google Earth	Equere et al. (2021)		
Weighted Average Height of Buildings	$\frac{\sum_{i=1}^{N} A_i \dot{\lambda}_i}{\sum_{i=1}^{N} A_i}, A_i: \text{ ground area of the building; } \dot{\lambda}_i: \text{ height of the building; N: total number of buildings}$	Qin et al(2015)		
Digital surface model	High-resolution images from remote sensing	Tian et al. (2019)		
Variance				
Height variance (HV)	Height variation of buildings within a block	Huang and Wang (2019)		
Rugosity	$\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N} (WAHB_{i} - Avg.WAHB_{buffer})^{2} \times l_{i}^{2}\right)} / \sum_{i=1}^{N} l_{i}$	Adolphe (2001)		
z0(거칠기길이)	$\begin{aligned} z_d &= \left(1 + \alpha^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1)\right) \times Z_H, \\ z_0 &= \left[ \left(1 - \frac{z_d}{Z_H}\right) exp \left\{ - \left[0.5\beta \frac{C_D}{k^2} \left(1 - \frac{z_d}{Z_H}\right) \lambda_F \right]^{-0.5} \right\} \right] \times Z_H \\ \lambda_p &= \frac{A_p}{A_T}, \ \lambda_f = \frac{\sqrt{A_p} \times Z_H}{A_T} \\ z_d: \ \text{GP번PH}(\text{zero-plane displacement}), \ z_0: \ \texttt{T} \\ \texttt{Z} \\ \texttt{I}: \ \texttt{C} \\ \texttt{T} \\ \texttt{C} \\ \texttt{I}: \ \texttt{C} \\ \texttt{T} \\ \texttt{S} \\ \texttt{T} \\ \texttt{S} \\ \texttt{T} \\ \texttt{S} \\ \texttt{T} \\ \texttt{T} \\ \texttt{S} \\ \texttt{T} \\ \texttt{S} \\ \texttt{T} \\$	Macdonald et al.(1998)		
Volume				

nume

Building volume 
$$\sum (A_{grd} \times f_u \times f_b \times \bar{v} \times H_f)$$

Floor Area Ratio  $\Sigma$ *Floor area of all buildings* (FAR) Area of study extent

Li et al. (2020)

Yoshida and Omae (2005) Lin et al. (2017)

도시형태 변수	산출식 혹은 설명	출처
Urban compactness (3D metric)	$\Sigma rac{area \ of \ building \ envelope}{volume \ of \ building}$	Yoshida and Omae (2005) Edussuriya et al. (2011)
Vacant Porosity factor in 3D space (Pf)	useful open volume total volume of urban fabric	Adolphe (2001)
Sky view factor (SVF)	Sky view factor	Chun and Guldmann (2014) Yan et al., (2014)
Aspect ratio	H/W	Silva et al. (2018) Jamei et al. (2015)
Density, Diversity	7, Design	
Land cover type	$\frac{\sum_{i=1}^{n} LCPF}{n} \times 100\%$ LCPF: Land cover pixel frequency	Yan et al., (2014) Ramakreshnan et al. (2019) Wong et al. (2016)
Density		
Building Density (BD)	$\frac{\sum_{i=1}^{n} {}^{RPF}}{n} \times 100\%$	Heiden et al (2012)
Fractal Dimension (FD)	$2.\frac{\log{(perimeter/4)}}{\log{(area)}}$	Hermosilla et al.(2014)
Impervious surface fraction(ISF)	$\frac{\sum Ssoil}{S}$	Silva et al., (2018)
Diversity		

Shannon Entropy 
$$\left\{-\sum_{i=1}^{N} p_i \ln(p_i)\right\}/\ln(k)$$

Cervero (2002)

도시형태 변수	산출식 혹은 설명	출처
Shape Index (SI)	Perimeter 4\sqrt{Area}	Hermosilla et al.(2014)
	$\sum_{j=1}^{n} \left[ \left( \frac{0.25p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right) \left( \frac{a_{ij}}{A} \right) \right]$ , higher SI, more irregular	Ke et al. (2021)
Vegetation Density (VD)	$\frac{\sum_{i=1}^{n} VPF}{n} \times 100\%$	Heiden et al (2012)

Variables	Unit	Source	
Meteorological variables			
Air temperature	°C	서울 열린 데이터 광장	
PM2.5	$\mu g/m^3$	스마트서울 도시데이터	
Relative humidity	%	센서(S-DoT) 환경 정보 <sup>1)</sup>	
Vertical variables			
V1: Vertical			
DSM	m	ALOS global digital surface model <sup>2)</sup>	
DSMnG	m	DSM-DEM <sup>3)</sup>	
WAHB(Weighted average height of building)	m		
V2: Variance	m	국토지리정보원 건물높이	
V3: Volume	$10^{6}m^{3}$	$DB_{A}$	
V4: Vacant	-		
Horizontal variables			
D1: Density			
Building area ratio (Residential and Commercial area ratio)	-		
Impervious surface area ratio (Building, industry, and road area ratio)	-		
D2: Diversity		환경부	
Shannon entropy (Residential, commercial, industry, green, blue and road area ratio)	-	환경공간정보서비스 토지피복도 <sup>5)</sup>	
Green area ratio	-		
Blue area ratio	-		
D3: Design			
Road area ratio	-		
1) https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-15969/S/1/datasetView.do			
2) <u>https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.ht</u>			
<ul> <li><u>m</u></li> <li><u>http://map.ngii.go.kr/ms/map/NlipMap.do</u></li> <li><u>https://www.ngii.go.kr/kor/board/view.do?sq=72762&amp;board_cod</u></li> <li>e=notice_ko</li> </ul>			

[표 4-4] 연구 투입 변수 리스트 및 출처

5) https://egis.me.go.kr/

# 제 5 장 연구 결과

# 제 1 절 기초 통계

이 연구는 3개 요인 총 14개 변수를 연구에 사용하였다. 변수는 기상요인, 수직 도시형태를 나타내는 4Vs(Vertical, Variance, Volume, Vacant)와 수평 도시형태를 대표하는 3Ds(Density, Diversity, Design)로 구성되어 있다. 변수는 측정 데이터, GIS, 리모트 센싱 데이터를 구득하여 약 30 x 30m 그리드로 취합하여 관측소 반경 500m 범위에서 집계하였다. 종속변수는 기상 요인의 대기 온도 데이터로 현장에서 측정된 데이터이다. 연구의 설명변수는 각 요인별로 기초 통계량을 정리하였다.

#### 1. 종속 변수

이 연구는 서울시 1,016개 고정 측정소에서 측정한 대기 온도 데이터를 사용하였다. 데이터는 서울시 전역 총 1,064개 관측소에서 1시간 단위로 공표된 데이터를 토대로 온도 분포와 시간 경과를 중심으로 나타나는 이상치를 제거하였다. 데이터는 여름과 겨울로 구분하여 취합하였으며, 여름은 2021.06.01~08.31, 겨울은 2021.12.01~2022.02.28의 시간 범위를 가진다. 이상치가 제거된 여름과 겨울의 대기 온도 기초통계는 [표 5-1]과 같다.

계절	Mean	St. Dev.	Min	Max
여름	27.226	0.744	24.191	28.963
겨울	2.090	0.941	-1.435	4.734

[표 5-1] 대기온도 기술 통계량

2. 설명 변수

기상요인은 상대습도와 PM<sub>2.5</sub> 농도 변수로 구성되어 있다. 여름엔 상대습도가 높게 나타났으며 겨울엔 PM<sub>2.5</sub> 농도가 높았다. 여름과 겨울의 상대습도 평균은 각각 68.229%(최대 89.241%, 최소 60.002%)와 51.895%(최대 71.077%, 최소 43.207%)이고, PM<sub>2.5</sub> 평균 농도는 각각 13.966µm(최대 22.557µm, 최소 2.107µm)와 21.950µm(최대 30.452µm, 최소 2.499µm)로 집계되었다.

수직 도시형태 요인의 첫 번째 요인인 Vertical은 공간의 높이를 의미한다. 지형 높이를 고려한 공간의 평균 높이(DSM)는 40.263m였고, 지형의 높이를 제외한 공간의 평균 높이(DSMnG)는 9.818m였다. 한편 대상지의 건물 가중평균높이(WAHB)는 5.416m으로 나타나 위성 이미지 데이터인 DSMnG의 9.818m와 차이를 보인다. WAHB는 GIS 데이터에서 구득할 수 있는 건물의 높이 데이터를 사용하여 다른 장애물이 없다는 가정 아래 가중 평균한 값이다. 이에 산림과 같이 건물이 없는 지역의 높이도 반영된 DSM, DSMnG와는 상당한 차이를 보일 수 있다.

두 번째 수직 도시형태 요인인 Variance는 건물 높이의 변위 차의 합을 의미한다. 값이 높을수록 건물의 높이가 다양하게 분포되어 있음을 의미한다. 연구 대상지의 Variance의 평균은 9.381m로 나타났다. 대상지의 평균 Volume은 1.127 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>였으며, Vacant 평균은 0.413였다. Volume은 값이 클수록 Vacant는 값이 작을수록 공간을 차지하는 건물의 부피가 작음을 의미한다. Variance, Volume과 Vacant는 모두 건물을 대상으로 하였으므로 공간을 차지하는 기타 장애물(전봇대, 가로수 등)은 포함되지 않았다.

수평 도시형태 요인인 Density눈 건축면적 비율과 불투수 면적 비율이다. 연구 대상지의 평균 건축면적비율은 29.7%, 불투수면적비율은 67.7%로 나타난다. Diversity 요인은 6개 토지이용에 대한 엔트로피가 0.677였으며, 평균 녹지 비율은 20.0%, 하천 비율은 1.2%로 나타났다. Design 요인인 대상지 평균 도로 면적은 38%로 나타났다.

연구에 투입되는 모든 변수의 상관관계 분석 결과 WAHB와 Volume(1), Vacant와 BDA(-0.9), Vacant와 Imperv(-0.7), Imperv와 BDA(0.7), Green과 BDA(-0.8), Green과 Imperv(-0.9), Green과 Vacant(0.8)의

94

상관관계가 매우 높게 도출되어 다중공선성 <sup>®</sup> 이 의심되었다. 일반적으로 ANN은 비선형 예측에 적합하고 다수의 가중치 매개변수가 중복 구조(redundant architecture)에 의해 구동되어 다중공선성에 둔감한 경향이 있다(Veaux and Ungar, 1994). 이런 이유로 ANN은 OLSR(Ordinary least squares Regression)에 비해 다중공선성에 덜 영향을 받고 모형 적합성과 예측력이 뛰어나다(Obite et al., 2020). 그럼에도 불구하고 이 연구는 모든 변수의 순열 조합에 의존하여 기여도를 산출하는 SHAP을 사용하므로 중복되거나 상관관계가 높은 변수 간의 기여도가 과소 혹은 과대 평가될 가능성이 있다. 이에 변수 간의 상관관계가 매우 높은 세 가지 변수(WHAB, BDA, Green)를 분석에서 제외하였다.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> 다중공선성은 두 개 이상의 설명변수가 서로 상관관계가 있는 상태를 말한 다. 설명변수 간의 상관관계는 통계적 가정(잔차의 일정한 분산, 정규 및 독립 성)을 위배하지 않을 수 있지만 다중공선성을 유발할 수 있으며(Ping et al., 2004), 다중공선성은 회귀계수의 표준오차를 증가시켜(McClendon, 2002) 일부 변수의 유의확률을 왜곡할 수 있다(Daoud, 2017).

Variables	Mean	St. Dev.	Min	Max
Meteorological factors				
Humi_여름	68.229	4.647	60.002	89.241
PM2.5_여름	13.966	2.138	2.107	22.557
Humi_겨울	51.895	4.177	43.207	71.077
PM2.5_겨울	21.95	3.514	2.499	30.452
Vertical factors				
V1: Vertical				
WAHB	5.416	2.571	0.011	23.306
DSM	40.263	21.513	8.075	268.628
DSM_DEM	9.818	4.151	1.081	32.786
V2: Variance	9.381	10.622	1.523	177.793
V3: Volume	1.217	0.578	0.002	5.237
V4: Vacant	0.413	0.162	0.113	0.993
Horizontal factors				
D1: Density				
BDA_R	0.297	0.109	0.002	0.548
Imperv	0.677	0.142	0.002	0.921
D2: Diversity				
Entropy	0.678	0.080	0.003	0.907
Green	0.201	0.166	0.004	0.999
Blue	0.012	0.044	0	0.463
D3: Design				
Road	0.38	0.097	0	0.663

[표 5-2] Descriptive statistics (N=1,016)


[그림 5-1] 전체 도시형태 변수의 상관관계 그래프



[그림 5-2] 최종 선정된 도시형태 변수의 상관관계 그래프





[그림 5-4] 수평 도시형태 변수 분포도

# 제 2 절 수직 도시형태의 효과 분석

이 연구는 이 연구에서 분류한 수직 도시형태의 네 가지 요인(Vertical, Variance, Volume, Vacant)이 대기 온도에 미치는 영향을 확인하기 위해 실증연구를 시도하였다. 종속변수인 대기온도 데이터는 기후요인에 해당하는 두 가지 설명변수인 상대습도와 PM<sub>2.5</sub> 자료와 함께 서울시 1,064개 고정된 장소에서 한 시간 단위로 측정된 패널 데이터로 구성되어 있다. 시간에 따라 동일한 개체를 반복 측정하는 패널데이터는 이분산성과 시계열 자기상관이 나타날 수 있으며, 이분산성과 시계열 자기상관이 나타날 경우 이를 적절히 통제하여 분석해야 한다(민인식, 2012). 이에 시계열 분석을 수행하기 전에 이분산성과 시계열 자기상관을 확인하여 자료의 적합성을 검증하였다.

#### 1. 대상지 현황

이분산성은 Breusch-Pagan 검정, 시계열 자기상관은 더빈왓슨(Durbin-Watson) 검정과 LM(Lagrange Multiplier) 검정을 수행하였다. 이분산성 검증 결과 귀무가설을 기각하여 이분산성이 존재하는 것으로 나타났다. 시계열 자기상관성은 시간에 따라 변하는 변수(time-varying)인 일평균 온도, 상대습도, PM<sub>2.5</sub> 변수에 대해 확인하였다. 먼저 자료의 정상성 여부를 확인하기 위해 단위근 검정인 ADF(Augmented dickey-fuller)를 시행하였고, 모든 시계열 변수가 귀무가설을 기각하여 정상성을 가지고 있었다. 시계열 자기상관 검정 결과 더빈왓슨 검정이 가설을 기각하여 자기 상관이 있음을 확인하였다. 자료에서 이분산성과 시계열 자기상관을 확인했으므로 이를 통제하기 위해 Panel GLS(Generalized Least Square)분석을 수행해야 한다.

하우스만 검정으로 패널 모형의 설명변수가 지역 효과에 내생성을 가지고 있는지 확인하였다. 내생성은 모형에 포함되지 않은 변수가 설명변수와 상관되어 있을 때 발생한다. 내생성 문제는 고정효과 혹은 임의효과를 고려하여 해결할 수 있으며, 하우스만 검정을 통해 확인할 수 있다. 하우스만 검정은 임의효과 모형이 옳다는 귀무가설을 바탕으로 일치 추정량(고정효과)과 효율 추정량(임의효과)가 서로 일치하는지 분석하는 검증 방법이다. 확인 결과 귀무가설을 기각하여 모형에서 내생성이 발견되었다. 따라서, 오차항이 개체별 효과와 상관하는 내성성을 통제하기 위해

100

고정효과를 모형에 적용해야 한다.

이분산성, 시계열 자기상관 및 내생성을 통제하기 위해 이 모형은 Panel GLS 고정효과 모델을 사용하여 분석을 수행해야 한다. 다만, 고정효과 모델을 사용하면 종속변수에 대한 시간 불변량을 통제 변인으로 사용하여 시간 불변량이 시간 공변량에 대한 추정 결과에서 사라지는 문제가 발생한다(Oaxaca and Geisler, 2003). 이 연구의 주요한 관심이 시간 불변하는 표본의 수직 도시형태이므로 고정효과를 사용하여 도출된 결과로는 연구의 가설을 증명하기 어렵다. 이에 종단 분석을 통한 연구 가설 검증이 어려우므로 횡단 분석으로 접근하는 것이 바람직하다.

[표 5-3] 이분산성(Breusch-Pagan) 및 시계열 자기상관(Durbin-Watson, Breusch-Godfrey) 검정 결과

이분산성 검정 (Breusch-Pagan)			시계열 자기상관 Durbin-Watson		
BP	df	p-value	DW	p-value	
19223	15	< 0.01	0.283	< 0.01	

	[표]	5-4]	ADF	단위근	및	하우스만	검정	결과
--	-----	------	-----	-----	---	------	----	----

出入	ADF 검	정	하우스만 검정		
也十	Dickey-Fuller	p-value	Chisq	df	p-value
온도	-69.581	0.01			
상대습도	-258.2	0.01	106,371,089	2	< 0.01
PM2.5	-251.71	0.01			

### 2. ANN 분석 결과

이 연구는 대기 온도에 영향을 미치는 수직 도시형태 변수의 영향력을 도출하기 위해 ANN 모형을 사용하였다. 이 연구에서 적용한 ANN 모형은 2-hidden layers를 적용하였으며, 활성화 함수는 ReLU를 사용하였다. 데이터 셋은 결과의 오버피팅(Overfitting)을 방지하기 위해 전체 데이터를 트레이닝 데이터와 테스트 데이터(70%, 30%)로 구분하였다. 오버피팅은 딥러닝 기반 모형이 트레이닝 과정 중 데이터를 모두 외워 정확도가 높게 왜곡되는 현상을 말한다. 모형의 훈련은 트레이닝 데이터로 진행하고 검증은 테스트 데이터를 사용하여 이러한 과적합을 방지할 수 있다. 모형은 SGD(Stochastic gradient descent)를 사용하여 최적화하였다. SGD는 경사하강법의 단점을 보완하여 학습률과 gradient 방향을 학습에서 고려할 수 있도록 개선된 확률론적 최적화 방법이다(Bottou, 2012). 2-hidden layers의 노드 개수와 SGD 학습률은 여름과 겨울 모형에서 차이를 보인다. 연구에서 사용된 주요한 파라미터는 다음과 같다.

Parameters	여름	겨울
Input nodes	19	ditto
Number of hidden layers	2	ditto
1 <sup>st</sup> hidden layer nodes	30	28
2 <sup>nd</sup> hidden layer nodes	30	28
Output nodes	1	ditto
Activation function	ReLU	ditto
Epochs	5,000	ditto
Optimizer	SGD	ditto
Learning rate	0.005	0.001
Loss	MSE	ditto

[표 5	5-5]	ANN	parameter
------	------	-----	-----------

모형의 손실 값은 학습이 거듭될수록 급격하게 낮아졌다. 손실 값은 최종 5,000번째 학습 시에는 0에 수렴하여 모형의 최적화가 정상적으로 이루어졌음을 알 수 있다. 모형은 RMSE, MAE, MAPE 값을 통해 검증하였다. 트레이닝 데이터를 통해 학습한 모형에 테스트 데이터를 입력하여 모형이 예측한 값과 실제 관측 값의 RMSE, MAD, MAPE를 비교한 결과는 여름과 겨울 모형이 각각 0.057, 0.045, 4.465%와 0.074, 0.054, 5.378%로 나타났다. 트레이닝 데이터를 통해 예측한 모형에 테스트 데이터를 입력했을 때의 정확도가 상당히 높게 나타났음을 확인할 수 있다. [그림 5-6]은 관측치와 예측치를 그래프에서 비교한 결과를 보여준다.



[그림 5-5] 예측 모형의 loss 변화: (좌) 여름, (우) 겨울

[표 5-6] 트레이닝 데이터와 테스트 데이터에 대한 RMSE, MAE, MAPE

	여북		겨울		
	Training	Training Test		Test	
RMSE	0.049	0.057	0.088	0.080	
MAD	0.038	0.045	0.061	0.057	
MAPE	3.837	4.465	6.078	5.673	



[그림 5-6] 테스트 데이터의 마지막 200개 값의 관측치와 예측치 그래프: (위) 여름, (아래) 겨울

3. SHAP 분석 결과

SHAP는 종속변수의 변화에 기여하는 모든 변수의 상대적 기여를 확인할 수 있다. [그림 5-7(a)]는 여름철 모형에서 도출된 중요도를 바탕으로 Index 2번 변수의 상대적 기여 결과 예시이다. 빨간색 바는 온도 증가, 파란색 바는 온도 감소에 영향을 미치는 변수를 의미하며, 우측 상단의 base value는 트레이닝 데이터의 평균 shapley value, f(x)는 해당 데이터를 통해 산출된 shapley value를 의미한다. 바의 간격은 해당 변수의 영향력의 크기를 의미하고, f(x)를 중심으로 영향이 큰 순서대로 나열되어 있다.

Index 2번은 Serial no. OC3CL200014 지점으로 CBD에 위치해 있다. Imperv, Humi, BDV, Rugosity의 순서로 대기 온도 증가에 영향을 미쳤으며, DSMnG, Shannon, BDV\_poro 등은 대기 온도를 감소시키는 데 영향을 미쳤다. 해당 지역은 CBD에 위치해 있어 불투수면적이 넓고 고층 건물이 매우 조밀하게 조성된 지역이다. 건물 평면 면적은 열섬 효과 강도 증가의 가장 큰 원인이며, 건물의 밀도가 높을수록 강도가 더 강하고 빠르게 증가한다(Li et al., 2020). 또한, 공간을 가득 채운 건물로 인해 열 용량이 증가하여 대기 온도가 증가하였을 것이다. 반면, 공간의 높이(DSMnG)는 그늘 효과를 만들어 온도를 저감하고, CBD와 같이 밀도가 높은 지역의 경우 개방성(BDV\_poro)이 환기성능을 향상시켜 온도를 저감하는 데 역할을 하였을 것이다.

[그림 5-7(b)]는 각 표본의 특성을 나타내는 [그림 5-7(a)]를 90°로 회전시켜 전체 표본을 수평으로 쌓아 만든 그래프로 비슷한 특성을 보이는 표본에 따라 순서화 시킨 결과를 보여준다. 시각적으로 몇 가지 그룹으로 분류할 수 있음을 확인할 수 있다.



[그림 5-7] SHAP force plot: (a) index 2의 결과, (b) 전체 결과

그림 [그림 5-8]의 (a)와 (b) 그래프는 변수의 상대적 기여도(Feature importance)를 나타내며, (a)는 Global Shapley Value, (b)는 Local Shapley Value를 의미한다. Global Shapley Value는 각 변수의 Shapley value를 절대값으로 표현한 바 그래프이므로 Shapley Value를 결정하는 데 얼마나 영향을 미치는지에 따라 바의 크기가 달라진다. 절대값이므로 해당 변수가 양의 영향을 미치는지, 음의 영향을 미치는지는 판별할 수 없다. 반면,

Local Shapley Value는 해당 변수의 표본별 Shapley Value를 점으로 찍어 표현된 그래프이다. X축은 Shapley Value를 나타내며, 값이 커질수록 대기 온도가 증가하고, 작아질수록 대기 온도가 낮아짐을 의미한다. Y축에 표기된 Feature Value는 빨간색은 변수가 Shapley Value에 양의 영향을 미치고, 파란색은 Shapely Value에 음의 영향을 미치는 것을 뜻한다.

#### 여름철

여름 모형의 로컬 중요도는 전체적으로 크기 효과의 경향이 오른쪽 꼬리가 더 길게 나타난다. 이는 온도를 증가시키는 원인이 더 많다는 사실을 나타내며, 반대로 온도를 낮출 수 있는 방법이 많지 않음을 의미한다. 수직 도시형태 변수 중에서는 Vacant(개방성) 변수가 가장 중요하게 도출되었다. 전체 변수 중 중요도가 가장 큰 변수는 Humi(상대습도)였으며, 도시형태 변수 중에서는 Density(불투수면적)이다.



[그림 5-8] 여름 모형의 Feature importance: (a) Global Shapley Value, (b) Local Shapley Value

변수의 개별 영향력은 Dependence plot을 통해 자세히 확인할 수 있다. SHAP은 Dependence plot을 제공하여 변수 변화의 한계 효과를 보여준다(Lundberg et al., 2020). Dependence plot은 각 입력변수에 할당된 Shapley value를 산점도로 나타낸 그래프로 입력 데이터에 따른 Shapley value의 변화를 살펴볼 수 있다. 무엇보다 Dependence plot의 가장 큰 장점은 다른 변수와의 상호작용을 살펴볼 수 있다는 점이다. [그림5-9]는 Dependence plot의 결과이다. x축은 설명 변수, y축은 Shapley value를 나타내며, 오른쪽에 위치한 세로축은 상호작용 변수의 크기를 색 변화를 통해 보여준다. 예컨대, 개방성이 증가할수록 대기 온도를 낮추는 방향으로 영향을 미치고 있으며, 개방성과 SHAP value가 완전한 선형 관계로 나타나지는 않는다. Vertical\_DSMnG(공간 평균높이)가 높은 지역은 대체로 SHAP value 0 이하에 분포되어 있어 온도를 낮추는 데 영향을 주고 있다.



[그림 5-9] 여름 모형의 개방성 변수 SHAP dependence plot

개방성은 수직 도시형태 변수 중 가장 중요한 변수로 도출되었다. Dependence plot에 따르면 개방성이 약 0.3을 초과하면 대체로 온도를 낮추는 데 기여하였다. 개방성 값 0.3은 공간의 평균 높이 이하에서 오픈스페이스가 30%임을 의미한다. 개방성과 공간 평균 높이의 상호관계는 평균 높이가 높은 지역에서 상대적으로 개방성이 크고, 대기 온도를 낮추는 경향이 있었다([그림 5-9]). 그러나 개방성의 증가와 온도 저감의 관계는 선형 관계가 아니며, 개방성이 증가할수록 온도 저감 효과가 줄어드는 것으로 나타났다. 개방성과 Variance(높이 변위)의 상호관계는 개방성과 건물 높이와의 관계를 보다 분명하게 보여준다. 개방성이 낮은 지역은 대체로 지역의 높이가 일정하게 유지되고 있었으며 SHAP value가 양으로 온도를 증가시키는 데 영향을 주고 있었다([그림 5-10(a)]). 반면 개방성과 Volume(건물체적)의 상호관계는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

한편, 개방성과 불투수면적비율은 개방성이 크고 불투수면적이 적은 지역(녹지와 하천이 많은 공간)일수록 온도를 더 크게 낮추고 있음을 보여주었다([그림 5-10(b)]). 일부 불투수면적이 높은 지역에서 온도를 낮추는 데 영향을 주고 있는데, 개방성과 평균 높이의 결과에 따라 이 지역의 높이가 온도를 저감하는 데 영향을 주었을 것으로 추측할 수 있다.

수직 도시형태 변수 중 두 번째로 중요한 변수는 공간의 평균높이로 나타났다([그림 5-10(c)]). 평균 높이는 증가할수록 대기 온도를 낮추는데 기여하였다. 평균 높이 5m에서 10m까지는 분포가 매우 다양하며, 개방성이 높은 지역이 만드는 기울기보다 개방성이 낮은 지역이 만드는 기울기가 급격하게 나타난다. 이는 개방성이 낮은 지역에서 높이에 따른 온도 저감에 더 민감하게 반응하며, 지역의 높이가 낮아 그늘 효과를 낼 수 없는 경우 개방성을 확보하면 온도 증가를 어느 정도 상쇄한다고 해석할 수 있다. 공간의 평균 높이와 체적의 상호작용은 개방성의 결과와는 반대로 나타난다. SHAP value는 지역의 평균 높이 약 8m에서 기여도의 방향이 양에서 음으로 바뀌는 것으로 나타난다. 이는 지역의 평균 높이가 약 8m를 초과하면 대체적으로 지역의 온도를 낮추는 방향으로 영향을 준다는 것을 의미한다.

Vertical\_DSM(지형을 포함한 공간높이, 이하 지형높이)는 높이가 증가할수록 대기 온도를 증가시키는 데 영향을 주었다([그림 5-10(d)]). 지형 높이는 개방성과 상호작용하는 것이 특징이다. 개방성이 큰 지역에서 지형높이가 증가할수록 온도가 증가하는 패턴을 보여준다. 이는 지형이 높은 지역에서 개방성이 클 경우 건물에 의한 그늘 효과를 기대하지 못하고 태양복사열이 강한 여름에 단파복사에 더 많이 노출되어 온도가 증가할 수 있다.

높이 변위(Variance)는 뚜렷한 패턴을 보이지 않는다. 약 10m까지는 온도를 낮추거나 증가시키는 효과의 분포가 매우 다양하게 나타나 다른 요인이 주는 영향이 더 크게 작용한다고 판단할 수 있다([그림 5-10(e)]). 그러나 10m를 넘어가면 변위차가 커질수록 대기 온도에 양의 영향을 주는 것으로 나타난다. 건물체적은 중요도가 높지 않고 SHAP value도 체적이 증가할수록 양의 영향을 주는 추세를 보이지만 변화의 기울기가 완만한 형태를 보인다([그림 5-10(f)]). 대체로 체적이 낮으면 온도를 낮추는 데 더

108

기여하다가 일정 체적(1 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)을 넘어서면 SHAP value가 양의 영향으로 기여도의 방향이 변화한다. 지역의 높이와 체적이 양의 선형성을 보이는 것은 자연스러운 결과이며 비록 높이와 체적이 증가하면서 SHAP value가 양의 증가를 보이지만 높이 증가에 의한 SHAP value 저감을 감안하면 높이를 증가시키는 것이 온도에는 더 나은 환경을 제공한다고 생각할 수 있다.

불투수면적비율은 0.6을 초과하면 온도를 증가시키는 방향으로 작용한다([그림 5-10(g)]). 표본의 평균 불투수면적비율이 0.677인 것을 감안하면 대부분의 지역에서 양의 영향을 미치고 있다고 생각할 수 있다. 불투수면적비율이 높은 지역은 대체로 Design(도로면적비율)도 높게 나타난다. 불투수면적비율이 0.6으로 동일할 때 도로면적비율이 높은 지역에서 SHAP value가 더 양의 영향을 주는 것으로 나타난다. 오히려 건물이 많은 지역의 온도가 더 낮을 수 있음을 의미한다. 여름에는 건물의 그늘 효과에 의한 온도 저감이 도로가 만드는 환기성능보다 지역의 온도를 낮추는 데 효과적임을 암시한다([그림 5-10(g)]).



[그림 5-10] 여름 모형의 SHAP dependence plots

겨울철

겨울 모형의 로컬 중요도는 전체적으로 여름 모형의 결과보다 크기 효과의 경향이 오른쪽에 더 치우쳐 있다. 이는 도시화된 지역이 대체로 겨울철의 온도를 증가시키는 방향으로 작용하고 있음을 나타내며 반대로 온도를 낮출 수 있는 방법이 많지 않음을 의미한다. 수직 도시형태 변수 중에서는 Volume(건물체적) 변수가 가장 중요하게 도출되었다. 전체 변수 중 중요도가 가장 큰 변수는 PM<sub>2.5</sub>(초미세먼지)였으며, 도시형태 변수인 Design(도로면적비율)가 두 번째로 중요한 변수로 도출되어 여름 모형과 다른 결과를 보여주었다.



[그림 5-11] 겨울 모형의 Feature importance: (a) Global Shapley Value, (b) Local Shapley Value

겨울 모형에서는 건물체적이 수직 도시형태 변수 중 가장 크게 영향을 미치는 변수로 나타났다. 체적이 커질수록 온도를 증가시키는 데 더 기여하는 경향을 보인다. 체적은 체적이 동일할 때 지형 높이가 낮거나 미세먼지 농도가 높은 지역에서 SHAP value 수치가 급격히 증가하는 현상이 일부 관찰되지만([그림 5-12(a)(b)]), 그 관계성이 두드러지진 않았다. 반면 불투수면적비율과 체적의 관계는 분명한 패턴을 보이며, 불투수면적비율과 건물 체적이 큰 지역은 온도가 상승하는 데 기여하였다([그림 5-12(c)]).

겨울철에는 Vertical\_DSMnG(공간높이)가 높아질수록 온도를 낮추는 데 더 크게 기여하였다([그림 5-12(d)]). 공간높이는 체적과 상호작용하여 대체로 공간의 높이와 체적이 큰 지역은 SHAP value에 음의 영향을 주었다. 이는 높이와 체적이 증가하면서 생기는 그늘 효과 때문으로 보인다. 공간의 높이는 Density(불투수면적비율)와의 상호작용이 가장 분명히 나타난다. 공간의 높이가 같을 때, 경향을 따르지 않고 SHAP value가 높게 나타나는 지역을 제외하면 불투수면적비율이 낮은 지역, 즉 투수면적비율이 높은 지역의 SHAP value가 더 높은 경향을 보인다.

Variance(높이변위)는 큰 특징이 보이지는 않으나 여름과 비교하면 더 다양하게 분포하였다. 이는 겨울철에 변위의 크기로 설명하지 못하는 요인이 존재하는 걸 의미한다. 변위가 같을 때 개방성이 높은 지역은 개방성이 낮은 지역보다 온도를 증가시키는 방향으로 기여하였다([그림 5-12(e)]).

Vacant(개방성)는 여름철과는 달리 중요도가 가장 낮은 변수였다. 개방성은 Vertical\_DSM(지형높이)과의 상호작용이 분명하게 관찰된다. 개방성이 같을 때 지형높이가 높은 지역은 낮은 지역에 비해 온도를 증가하는 방향으로 작용하였다. 이는 지형이 높은 곳의 온도가 높다는 선행연구의 결과(Equere et al., 2021)를 지지한다([그림 5-12(f)]).



[그림 5-12] 겨울 모형의 SHAP dependence plots

# 제 3 절 도시형태 유형 군집

#### 1. 군집 개수 선택

GMM 분석을 위해 공분산 유형 <sup>®</sup>과 군집 개수에 따른 BIC 점수를 계산하였다. 입력 변수(수직 및 수평 도시형태 변수)의 BIC 계산 결과 공분산 유형은 각 구성요소가 고유한 일반 공분산 행렬을 가지는 유형의 BIC 값이 모든 군집에서 가장 낮았으며, 최적 군집의 개수는 5개였다. 즉 이 데이터는 5개의 정규 분포 그룹이 결합된 형태로 볼 수 있으며, 결과에 따라 군집을 5개로 설정하여 GMM 분석을 수행하였다.



[그림 5-13] BIC 점수 계산 결과

<sup>\*</sup> 각 가우스 성분은 공분산 행렬을 가지고 있다. 공분산 구조는 기하학적으로 군집을 형성하는 타원체 모양의 신뢰 영역의 형태를 결정한다. 모든 성분에 대한 공분산 행렬이 완전 공분산 행렬인지, 대각 공분산 행렬인지 혹은 모든 성분에 동일한 공분산 행렬이 있는지 지정할 수 있다. BIC 계산을 위한 공분산 유형은 다음과 같다: 1) Full: 각 구성요소는 고유한 일반 공분산 행렬을 가진다. 2) tied: 모든 구성 요소는 동일한 일반 공분산 행렬을 공유한다. 3) diag: 각 구성요소는 고유한 대각선 공분산 행렬을 가진다. 4) spherical: 각 구성요소는 고유한 단일 분산이 있다.

데이터가 5개의 정규분포로 이루어졌는지 확인하기 위해 주성분 분석(Principal component analysis, PCA)으로 차원을 축소한 뒤 벡터 공간에 맵핑하였다. 벡터 공간에 맵핑하기 위해 주성분을 3차원으로 추출하였으며, 결과는 [그림 5-14]와 같다. 데이터가 5개의 군집으로 구분되고 있음을 확인할 수 있다.



[그림 5-14] 군집 분류 3D 산점도

2. 군집분류 결과

온도

여름철 전체 표본 지역의 최대 온도는 차이는 4.772°C였다. 평균 온도가 가장 높은 지역은 군집 1에 속한 지역으로 28.963°C로 나타났으며, 가장 낮은 지역은 군집 5에 속한 지역으로 24.191°C로 나타났다. 도시형태 군집의 평균 온도는 최소 26.003°C(군집 5)에서 27.533°C(군집 1) 사이에 분포하며 그룹 간 온도 차이는 최대 1.530°C였다.

겨울철 전체 표본 지역의 최대 온도 차이는 5.611°C였다. 평균 온도가 가장 높은 지역은 군집 3에 속한 지역으로 4.734°C로 나타났으며, 가장 낮은 지역은 군집 5에 속한 지역으로 -1.435°C였다. 도시형태 군집의 평균 온도는 최소 0.68°C(군집 5)에서 최고 2.456(군집 1) 사이에 분포하며, 그룹 간 온도 차이는 최대 1.776°C였다.

그룹 간 온도 차이는 연구의 가설과 같이 그룹 간 수직 및 수평 도시형태 차이에 기인하였을 것으로 기대된다. [그림 5-15]는 5개 도시형태 군집의 상자그림이며, [표 5-7]은 군집별 변수의 평균, 최소 및 최댓값을 보여준다.

#### 수직 도시형태: Vertical

Vertical 지표는 DSM과 DSMnG 변수를 포함한다. DSM은 지형 높이를 포함한 지역의 높이로 평균 DSM은 군집 2가 가장 낮고(28.222m), 군집 5가 가장 높았으며(62.594m), 군집 5는 최소 8.075m에서 최대 268.628m까지 매우 다양한 분포를 보였다. DSMnG는 지형 높이를 제외한 높이이다. 평균 DSMnG가 가장 높은 지역은 군집 3이었으며(13.59m), 가장 낮은 지역은 DSM이 가장 높았던 군집 5였다(7.861m). 가장 높은 지역은 높이가 32.786으로 군집 3에 속하고, 가장 낮은 지역은 1.081m로 군집 5에 속한다.

#### 수직 도시형태: Variance

Variance를 나타내는 변수인 Rugosity는 군집 5의 평균이 가장 컸으며(21.632m), 군집 1에서 가장 작았다(5.622m). 일부 매우 큰 지역이 군집 5에 포함되어 평균이 높아졌으므로 중위값이 가장 큰 군집 3의 지붕높이가 가장 다양한 것으로 보이며, 군집 1은 일정한 높이의 건물로

### 수직 도시형태: Volume

건물의 체적을 나타내는 변수인 BDV의 평균은 군집 3이 가장 컸고(1.856 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>), 군집 5가 가장 작았다(0.698 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>). 군집 3은 건물의 높이 변수인 DSMnG가 가장 큰 지역으로 고층 건물이 많아 체적이 가장 크게 나타난 것으로 보인다. 군집 2는 체적이 매우 다양하게 분포되어 있다.

#### 수직 도시형태: Porosity

지역의 개방성을 나타내는 변수인 Porosity는 군집 5가 가장 컸고(0.799), 군집 1이 가장 작게 나타난다(0.311). 군집 5는 개방성이 매우 뛰어난 지역의 집합이며, 군집 1은 건물 높이와 높이의 변위가 낮은 수준이고, 개방성도 가장 낮게 나타나 낮고 일정한 높이의 건물이 매우 조밀하게 조성된 지역으로 판단된다.

#### 수평 도시형태: Imperv

불투수면적 비율은 군집 1과 군집 3이 가장 크게 나타난다(0.73). 군집 1과 군집 3은 모두 매우 도시화된 지역으로 수직 도시형태 변수에 따르면 군집 1은 낮고 일정한 높이의 건물이 조성된 지역이고, 군집 3은 높고 변위 차가 매우 다양한 지역으로 생각할 수 있다. 군집 5는 불투수면적 비율이 가장 낮은 지역이다(0.325). 수직 도시형태 변수의 분포에 따라 군집 5는 개발화가 덜 된 산림 인접지역으로 생각할 수 있다.

## 수평 도시형태: Shannon

Shannon 엔트로피 점수는 모든 군집이 대체로 높게 나타난다. 군집 5가 낮게 도출된 것은 군집 5에 도시화되지 않은 지역이 대다수 포함되어 있기 때문이다. 군집 2는 평균은 가장 높으나 분포가 매우 다양하다. 군집 1, 군집 3, 군집 4의 Shannon 엔트로피 점수는 거의 비슷하다.

### 수평 도시형태: Blue

수 공간은 군집 1과 군집 3은 거의 존재하지 않으며, 군집 2와 군집 5에 대부분 포함된다. 군집 2와 군집 5가 하천 인근에 위치한 지역으로 생각할 수 있고, 분포 크기로 볼 때, 군집 2는 작은 하천, 군집 5는 큰 하천 인접 지역으로 보인다.

수평 도시형태: Road

도로면적 비율의 평균값은 군집 3이 가장 크고(0.444), 군집 5가 가장 작다(0.254). 위의 결과에 따르면 군집 3은 높이가 다양한 고층 건물이 밀집한 지역으로 도로면적도 매우 큰 지역의 집합이다. 반면, 군집 5는 산림 및 하천 인접 지역에 위치해 있으며, 도로면적도 매우 낮아 가장 도시화되지 않은 지역의 집합으로 생각할 수 있다.





[그림 5-15] 군집별 상자그림

Variables -		군집					
		1	2	3	4	5	
	mean	27.532	27.345	27.120	26.760	25.811	
Temp (d르)	min	25.672	25.603	25.323	24.490	24.191	
(12)	max	28.963	28.907	28.582	28.515	27.435	
m	mean	2.456	2.142	1.925	1.564	0.680	
Temp (겨우)	min	0.037	-0.370	-0.374	-0.589	-1.435	
(212)	max	4.176	3.991	4.734	4.151	2.756	
<b>N</b> 7 . • 1•	mean	37.988	28.222	36.698	50.622	62.594	
DSM	min	16.625	14.024	9.157	15.891	8.075	
DOM	max	102.990	54.038	80.372	118.410	268.628	
<b>N</b> 7 . • 1•	mean	9.100	9.439	13.590	8.806	7.861	
Vertical. DSMnG	min	4.381	2.443	1.189	2.926	1.081	
Domino	max	18.810	27.026	32.786	20.840	19.425	
17 •	mean	5.622	14.745	18.203	6.522	21.632	
(Rugosity)	min	1.523	2.479	3.370	1.641	1.648	
(Rugosity)	max	13.901	81.284	51.738	13.507	177.793	
Volume	mean	1.181	1.206	1.856	0.850	0.698	
(BDV)	min	0.392	0.044	0.683	0.120	0.003	
(×10 <sup>6</sup> )	max	1.894	3.882	5.237	1.703	4.513	
Vacant (Porosity)	mean	0.311	0.556	0.484	0.469	0.799	
	min	0.113	0.260	0.304	0.139	0.633	
	max	0.569	0.963	0.736	0.834	0.993	
Density (Imperv)	mean	0.730	0.643	0.730	0.576	0.325	
	min	0.463	0.345	0.429	0.218	0.002	
	max	0.890	0.915	0.921	0.828	0.583	
Diversity: Entropy (Shannon)	mean	0.685	0.696	0.672	0.684	0.559	
	min	0.484	0.393	0.437	0.411	0.003	
	max	0.798	0.907	0.817	0.837	0.818	
Diversity: Blue	mean	0.000	0.067	0.000	0.009	0.127	
	min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	max	0.002	0.251	0.003	0.054	0.463	
	mean	0.378	0.408	0.444	0.337	0.254	
Design	min	0.173	0.262	0.237	0.128	0.000	
	max	0.655	0.663	0.633	0.590	0.489	

[표 5-7] 군집별 평균, 최소, 최댓값

3. 군집 특성

군집 1: 높이가 일정한 저층 건물 밀집 지역

군집 1은 높이가 일정한 저층 건물이 밀집된 지역이다. 상대적으로 수직 도시형태 변수는 대체로 낮게, 수평 도시형태 변수는 높게 나타난다. 지형이 낮은 곳에 위치하고 건물의 평균 높이도 낮은 수준이며, 높이의 변위도 가장 작다. 건물의 체적은 보통 수준이지만 개방성은 가장 낮게 나타나며, 주변에 수 공간이 없고 불투수면적은 매우 높은 도시화 지역이다([그림 5-22], [그림 5-23]). 이상의 결과는 이 지역이 UCL 이하 공간에 바람이 흐를만한 통로가 충분하지 않고, 낮고 일정한 높이의 건물이 상당히 밀집되어 있다는 것을 알려준다.

이 지역은 여름철 평균 온도(27.532°C)가 가장 높다. 이는 일정한 높이의 저층 건물이 밀집된 도시 형태가 열 환경적으로 열악하다는 것을 방증한다. 건물의 높이가 낮고 일정하여 그늘 효과에 의한 온도 저감을 기대할 수 없고, 건물이 공간을 빽빽하게 채우고 있어 환기 성능도 열악하다. 불투수면적 비율도 높고 하천도 분포하지 않아 온도를 낮출만한 조건을 찾기 어렵다. [그림 5-16]은 이 군집에 해당하는 지역 중 랜덤으로 선택된 4개 지역의 항공사진이다. 높이가 일정한 저층 건물이 상당히 밀집되어 있다.



[그림 5-16] 군집 1: 높이가 일정한 저층건물 밀집지역

군집 2: 작은 하천에 인접한 저층 및 중층 밀집 지역

군집 2는 작은 하천에 인접하여 저층 및 중층 건물이 밀집된 지역이다. 군집 1과 비교하면 수직 및 수평 도시형태가 대체로 비슷한 수준을 형성하고 있다. 지형의 높이가 낮은 지역이고, 건물의 평균 높이와 체적은 낮은 수준이지만 분포가 다양하며, 건물 높이의 변위는 보통 수준이다. 한편, 개방성과 수 공간 면적 비율이 군집 5에 이어 두 번째로 높게 나타난다([그림 5-22], [그림 5-23]). 저층과 중층 건물이 밀집되어 있고, 작은 하천에 인접한 지역으로 수공간을 통한 환기 성능 향상의 혜택을 얻는 곳으로 판단된다.

군집 2의 여름철 평균 온도는 27.345°C로 군집 1에 이어 두 번째로 높다. 이 지역이 군집 1에 비해 평균 온도가 낮은 이유는 뛰어난 개방성으로 인해 더 나은 환기 성능을 보이기 때문으로 보인다. [그림 5-17]은 이 군집에 해당하는 지역 중 랜덤으로 선택된 4개 지역의 항공사진이다. 저층 및 중층 건물이 매우 밀집해 있지만 인접한 위치에 작은 하천이 흐르고 있어 어느 정도의 개방감을 확보하고 있다.



[그림 5-17] 군집 2: 작은 하천에 인접한 저-중층 밀집 지역

군집 3: 다양한 높이의 중층 및 고층 건물 밀집 지역

군집 3은 다양한 높이의 중층 및 고층 건물이 밀집된 지역이다. 수직 및 수평 도시형태 변수 모두 대체적으로 가장 높게 나타난다. 건물의 평균 높이, 건물 높이의 변위, 건물의 체적이 모두 가장 높고, 불투수면적 비율과 도로면적 비율도 가장 높게 나타난다. 고층 건물로 인해 체적이 가장 크게 나타나지만 도로가 넓게 분포되어 있어 개방성도 어느 정도 확보된 것이 특징이다([그림 5-22], [그림 5-23]). 이 지역은 다양한 높이의 고층 건물이 밀집되어 있어 그늘 효과가 충분하며, UCL 이하 공간에 바람이 흐를만한 통로 역시 확보되어 있다.

군집 3의 여름철 평균 온도는 27.120°C이며, 군집 1과 군집 2에 비해 온도 분포가 더 낮다. 이 지역은 고층 건물에 의한 그늘 효과를 기대할 수 있고, 도로의 면적도 넓게 분포되어 있어 보다 나은 환기 성능을 보인다. [그림 5-18]은 이 군집에 해당하는 지역 중 랜덤으로 선택된 4개 지역의 항공사진이다. 대체로 고층 건물이 밀집되어 있으나 사이 사이에 중층 건물이 조성되어 거칠기가 높아 보인다.



[그림 5-18] 군집 3: 다양한 높이의 중-고층 건물 밀집 지역

군집 4: 개방감이 뛰어난 중층 및 고층 건물 조성 지역

군집 4는 일정한 높이의 중층 및 고층 건물이 보통 정도의 밀도로 조성된 지역이다. 수직 및 수평 도시형태 변수 모두 대체적으로 보통 수준에서 형성되어 있다. 건물의 높이는 보통 수준이고, 높이가 일정하다. 체적은 낮은 편이고 하천이나 도로 면적 비율이 낮음에도 불구하고 개방감이 높은 것으로 보아 건물 간격이 어느 정도 확보되어 있음을 알 수 있다([그림 5-22], [그림 5-23]). 이 지역은 중층 및 고층 건물이 일정한 높이로 조성되어 어느 정도 그늘 효과를 누릴 수 있으며, 건물 사이에 간격이 있어 환기 성능에 의한 온도 저감 혜택을 기대할 수 있는 지역이다.

군집 4의 여름철 평균 온도는 26.76°C로 나타난다. 이 지역은 대체로 높은 건물이 조성되어 있지만 건물 사이 간격이 넓고, 그 사이에 녹지와 같은 투수성 포장이 조성되어 있음을 알 수 있다. 높은 건물에 의한 그늘 효과, 건물 배치에 의한 환기 성능 향상, 그리고 투수 포장에 의한 열 저감 효과가 나타난다. [그림 5-19]는 이 군집에 해당하는 지역 중 랜덤으로 선택된 4개 지역의 항공사진이다. 대부분 아파트단지로 조성된 지역이다.



[그림 5-19] 군집 3: 다양한 높이의 중-고층 건물 밀집 지역

군집 5: 녹지와 큰 하천 인접 지역

군집 5는 녹지와 큰 하천에 인접한 지역이다. 산림에 인접하여 지형이 높게 측정된 지역과 큰 하천에 인접하여 하천 면적 비율이 높은 지역이 군집에 포함되어 있다. 건물의 체적도 낮고 개방성이 매우 높아 도시 형태에 의해 생성되는 불균형한 열 환경이 나타나지 않을 가능성이 높다([그림 5-22], [그림 5-23]).

군집 5의 여름철 평균 온도는 25.811°C이며, 일부 지역은 24.191°C까지 낮게 나타난다. 이 지역의 평균 온도가 앞선 군집에 비해 낮은 이유는 블록 단위에서 보면 상당히 도시화되었음에도 불구하고 로컬 규모에서 산림과 하천이 인접해 있고, 개방감이 뛰어나기 때문이다. [그림 5-20]은 이 군집에 해당하는 지역 중 랜덤으로 선택된 4개 지역의 항공사진이다. 산림 인접부에 위치하거나 한강 혹은 주요지천과 맞닿아 있는 지역이 눈에 띈다.



[그림 5-20] 군집 5: 녹지와 큰 하천 인접 지역



[그림 5-21] 군집 분류 결과



[그림 5-22] 수직 및 수평 도시형태 변수의 군집별 방사형그래프



[그림 5-23] 수직 및 수평 도시형태 변수 평균 값의 군집별 데이터 방사형그래프

# 제 4 절 도시형태 유형에 따른 온도 변화

1. 군집 1: 높이가 일정한 저층 건물 밀집지역

여름철에 군집 1에서 가장 중요하게 도출된 변수는 Vacant(개방성)였다. 군집 1에 속한 지역은 높이가 일정한 저층 건물이 밀집한 지역으로 개방성이 매우 낮은 지역이다. 오른쪽 꼬리가 매우 길게 나타나 이 군집에서 관찰되는 낮은 개방성이 온도 증가에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. Vertical\_DSMnG(공간 높이)는 수직 도시형태 변수 중 두 번째로 중요하게 도출되었으며, 높이가 증가할수록 SHAP value는 감소하는 경향을 보인다. 공간의 높이와 개방성의 관계는 공간의 평균 높이가 같은 지역에서 개방성이 크면 오히려 온도가 증가할 수 있음을 보여준다.

군집 1에서 Variance(높이 변위)는 중요도가 낮은 편에 속하지만 대체로 온도를 낮추는 데 영향을 미쳤다. 높이 변위는 개방성의 상호작용을 고려하는 것이 중요하게 나타났다. 개방성이 낮고 높이가 일정하면 SHAP value가 양의 영향을 주므로 이러한 환경을 피하는 것이 바람직하다. 수평 도시형태에서는 Design(도로면적비율)의 영향력이 가장 크게 나타났다. 도로를 통해 개방성을 확보할 수 있으므로 도로면적비율의 증가가 환기성능 향상에 의한 온도 저감에 영향을 준 것으로 보인다.

한편 겨울 모형의 수직 도시형태는 여름 모형에서는 중요도 순서가 낮았던 Volume(건물체적)이 가장 중요하게 나타났다. 체적이 증가할수록 SHAP value가 증가하는 경향을 보이지만 기울기가 완만하여 변화의 효과가 크지 않으며 다른 변수와의 상호작용은 발견되지 않았다. 여름에 중요하지 않았던 또 다른 변수인 PM<sub>2.5</sub>(초미세먼지)는 겨울에는 매우 중요한 변수인 점이 눈에 띈다. 초미세먼지가 증가하면 SHAP value가 양의 영향을 주는 방향으로 작용한다. 이 결과는 초미세먼지가 태양복사를 대기 중에 가두어 온도를 증가시키는 영향이 있다는 선행연구의 결과를 지지한다(Ngarambe et al., 2021).

129



[그림 5-24] 군집 1의 여름 및 겨울 SHAP value 분석 결과

2. 군집 2: 작은 하천에 인접한 저층 및 중층 건물 밀집 지역

군집 2는 한강의 지류하천에 인접하여 저층 및 중층 건물이 밀집한 지역이다. 여름 모형의 SHAP value 결과는 군집 2가 Vacant(개방성)에 크게 영향을 받고 있음을 보여준다. 군집 1과는 다르게 왼쪽 꼬리가 길고 두껍게 분포하였으며, 대체로 개방성이 0.3을 넘어 온도를 저감하는 중요한 요인으로 작용하였다. 하천에 의해 확보된 개방된 공간은 군집 2 지역에 환기 성능을 향상하였을 것이다. 상대적으로 큰 수역이 경계에 인접하고 바람이 부는 지역은 냉각 효과가 크게 나타난다(Theeuwes et al., 2013).

Density\_Bl(하천면적비율)도 비율의 크고 작음에 관계없이 대부분 온도를 저감하는 데 영향을 미쳤다. 수 공간은 오랫동안 도시의 열 스트레스를 최소화하기 위한 전략의 핵심 요소였다(Coutts et al., 2012). 하천은 유체 흐름을 통해 흡수된 복사 열 에너지를 지역 외부로 방출할 수 있고(Hathway and Sharples, 2012), 열 용량이 콘크리트, 아스팔트와 같은 일반 건축 및 포장재의 약 4배 이상이며(Chatzidimitriou and Yannas, 2015), 물이 증발하면서 열 에너지를 소비하여(Manteghi et al., 2015) 지역의 열 에너지를 저감하는 데 도움이 된다.

군집 2는 Vertical\_DSMnG(공간 높이)가 높아지면 온도에 음의 영향을 미치지만, 공간 높이가 대부분 10m 이하로 낮게 나타나며, 대부분의 지역에서 온도를 증가시키는 방향으로 영향을 준다. 온도 저감을 위한 방법으로 일부 건물의 높이를 증가하는 경우, 온도에 양의 영향을 주는 Variance(높이 변위)의 영향으로 온도를 낮추는 데 큰 효과가 없을 것이다. 오히려 거칠기가 증가하여 하천에서 확보하는 개방성의 이점을 훼손할 가능성이 있다(Gunawardena et al., 2017). Density(불투수면적비율)가 높더라도 Design(도로면적비율)의 증가는 온도에 음의 영향을 주었다. 종합하면 이 지역은 하천에서 확보된 개방성의 이점을 누리는 방식이 여름철 온도를 낮추는 좋은 전략이 될 것이다.

Volume(건물 체적)은 군집 1과 마찬가지로 겨울철 군집 2의 온도 증가에 영향을 주는 가장 주요한 원인이었다. 기울기가 완만하고 다른 변수와의 상호작용 역시 발견되지 않았다. PM<sub>2.5</sub>(초미세먼지)의 중요도는 전체 모형과 군집 1에서 나타났던 중요도보다는 낮았으며, 오히려 중요하게 도출되지 않았던 하천의 영향력이 크게 나타났다. 공간 높이는 겨울철에도

131

지역의 온도를 낮추는 경향을 보였으며, 그 외 다른 변수의 SHAP value 변화는 미미했다.



[그림 5-25] 군집 2의 여름 및 겨울 SHAP value 분석 결과
3. 군집 3: 다양한 높이의 중-고층 건물 밀집 지역

여름철에 군집 3에서 온도를 저감하는 가장 중요한 수직 도시형태 변수는 Vertical\_DSMnG(공간 높이). 군집 1과 군집 2와는 다르게 중층과 고층 건물이 많은 지역으로 서울의 중심상업지구가 포함된 군집이다. 높이가 높아질수록 온도를 낮추는 데 영향을 크게 미쳤다. 공간 높이에 비례하여 공간을 차지하는 Volume(건물 체적)도 커지는데, 건물 체적은 반대로 온도를 증가시키는 방향으로 작용한다. 이 모순된 결과는 높이와 체적 변화에 따른 SHAP value의 변화량에 의해 해석 가능하다. 높이에 의한 온도 저감 영향은 -0.001~0.001 사이에 밀집한 반면 체적에 의한 온도 상승 영향은 0에서 0.005 사이에 밀집해 있다. 이는 높이에 의한 온도 저감의 영향이 체적에 의한 온도 상승의 영향을 상쇄하는 이상으로 작용한다는 것을 의미한다.

군집 3은 Vacant(개방성)이 0.3 이상으로 개방성은 대부분 온도를 낮추는 데 기여하였다. 개방성이 클수록 바람이 흐를 수 있는 공간이 많아 원활한 환기 성능을 보여주며, 이는 지역의 온도를 낮추는 데 도움이 된다(Merlier et al., 2018). 반면, Variance(높이 변위)는 대부분 온도를 증가시키는 데 기여하여 거칠기 증가에 의해 환기 성능이 저하되는 기존 연구 결과를 지지한다(Oke, 1988; Li et al., 2020).

수평 도시형태에서는 Design(도로면적비율)의 영향력이 크게 나타났다. 군집 3에 속한 지역은 도로가 넓게 분포하고 있다. 도로의 존재도 대부분 왼쪽 꼬리가 길게 뻗어 밀집된 고층 건물 사이에 위치한 도로의 면적이 클수록 환기 성능이 좋아져 온도를 낮추는 것으로 이해할 수 있다.

겨울철에는 체적이 가장 중요한 변수로 도출되었다. 온도 상승 영향이 0~0.002 사이에 밀집해 있어 여름과 비교하면 온도 증가에 미치는 영향력의 정도가 상당히 크다. 겨울에 체적이 큰 고층 건물이 흡수하는 열 에너지가 온도를 증가시키는 방향으로 작용한 것이다(Li et al., 2020). 겨울철 최고 온도가 군집 3에 속한 지역에서 나타난 이유와 무관하지 않다. 다음으로 중요하게 도출된 변수는 공간 높이였다. 공간 높이는 여전히 도시의 온도를 낮추는 데 영향을 미쳤다. PM<sub>2.5</sub>와 도로면적비율의 증가는 다른 군집과 마찬가지로 군집 3에서 온도 증가에 기여하는 요인이었으나 다른 변수와의 뚜렷한 상호작용 효과는 발견되지 않았다.



[그림 5-26] 군집 3의 여름 및 겨울 SHAP value 분석 결과

4. 군집 4: 개방감이 뛰어난 중-고층 건물 조성 지역

여름철에 군집 4에서 온도를 저감하는 가장 중요한 수직 도시형태 변수는 Vacant(개방성)으로 나타난다. 군집 4에 포함된 지역은 대규모 아파트 단지를 많이 포함하고 있어 뛰어난 개방감을 보여주는 지역이다. 개방성이 좋으므로 Vertical\_DSM(지형 높이)가 높으면 입사되는 태양복사량의 영향으로 온도가 증가한다. 그러나 그 영향은 미미한 수준이었다.

군집 4에서는 투수면적의 영향에 대한 시사점을 준다. 이는 이 군집에 가장 크게 영향을 미친 수평 도시형태 변수인 Density(불투수면적비율)의 결과를 통해 살펴볼 수 있다. 불투수면적비율은 0.2~0.8까지 매우 다양한 분포를 보이며, 투수면적비율과 역의 관계를 나타낸다. 불투수면적비율이 증가하면 온도에 양의 영향을 미치는 것으로 나타나는데, 이 연구는 불투수면적비율 0.65 이하에서 대체로 온도에 음의 영향을 미친다고 보고한다. 녹지와 같은 투수포장 지역의 온도 저감 효과는 널리 알려져 있다.

특이한 점은 Volume(건물 체적)은 대부분의 지역에서 SHAP value가 0 이하로 나타나 온도를 저감하는 방향으로 영향을 미쳤다는 점이다. 개방성이 어느 정도 확보된 상황에서 건물의 높이가 높아질 경우 그늘효과와 환기성능이 모두 좋아져 건물과 지표면의 열 흡수량이 줄어들므로 온도를 낮추는 방향으로 영향을 미쳤을 것이다. 그러나 체적이 미치는 영향은 미미한 수준이다.

군집 4에서 겨울철 온도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타난 수직 도시형태는 건물 체적이었다. 대부분의 지역에서 SHAP value가 0 이하로 나타나 온도를 저감하는 데 기여하였다. Vertical의 두 변수(지형과 공간 높이) 모두 온도를 저감하는 데 기여하였으며 효과는 미미하였다. 겨울에 군집 4의 온도를 증가시키는 주요한 요인은 Density(도로면적비율)와 PM<sub>2.5</sub>이다. 그러나 두 변수가 증가에 미치는 영향도 미미한 수준이고 다른 변수와의 뚜렷한 상호작용 효과는 발견되지 않았다.



[그림 5-27] 군집 4의 여름 및 겨울 SHAP value 분석 결과

5. 군집 5: 녹지와 하천 인접 지역

이 군집에 포함된 지역은 32개 지역으로 샘플이 매우 적어 뚜렷한 경향을 살펴보기는 어렵다. 다만 수직 도시형태 변수 중 가장 중요하게 나타난 Vacant(개방성)는 최솟값이 0.65일 정도로 이 군집에 속한 모든 지역의 개방성이 뛰어났다. 모든 지역의 SHAP value가 0 이하로 나타나 녹지와 하천에 의해 확보된 개방성의 온도 저감 효과는 분명히 확인할 수 있다.

Design(불투수면적비율)은 왼쪽 꼬리를 형성하며 가장 크게 음의 영향을 미치는 변수로 나타난다. 불투수면적비율의 범위가 0에서 0.6으로 나타나 다른 군집과 비교하면 매우 낮은 수준이고, SHAP value은 하나의 지역을 제외하고 모두 0 이하였다. 이 지역은 녹지와 하천에 인접한 지역으로 도시화가 온도 상승에 미치는 영향을 매우 잘 나타낸다. 이 지역에서 건물의 높이나 체적은 온도에 크게 영향을 미치지 못하였다.

겨울철 결과에서도 지역의 온도를 높이는 요인이 명확하기 드러나지 않는다. 다만 Volume(건물체적)과 PM<sub>2.5</sub>가 유독 높게 나타난 일부 지역에서 온도가 증가하는 데 영향을 미치고 있으며, 군집 5에 속한 대부분의 지역의 Vertical\_DSMnG(공간 높이)가 낮고 이것이 온도에 대한 양의 영향에 기여하였다.



[그림 5-28] 군집 5의 여름 및 겨울 SHAP value 분석 결과

## 제 6 장 토의

### 제 1 절 수직 도시형태 지표의 영향

수직 도시형태가 도시 기후에 미치는 영향을 살펴보기 위한 이 연구의 첫 번째 질문은 제안한 수직 도시형태 지표의 영향력을 확인하는 것이다. 이 연구는 네 가지 수직 도시형태 지표를 제안하였다: Vertical, Variance, Volume, Vacant. 네 가지 도시형태 지표는 통제변수로 활용된 세 가지 도시형태 지표(Density, Diversity, Design)와 기후 지표(상대습도와 초미세먼지 농도)와 함께 인공신경망 모형에 투입되었다. 서울시 1,016개 지역을 대상으로 트레이닝 및 테스트 데이터를 7:3으로 나누어 대기 온도를 예측한 인공신경망 모형의 정확도(MAPE)는 여름 4.465%, 겨울 5.673%로 도출되어 약 95%의 정확도를 보였다.

Vacant(개방성)와 Vertical\_DSMnG(공간 높이)의 증가는 여름철 대기 온도를 저감하는 데 영향을 미쳤다. 개방성은 수직 도시형태 중 여름에 대기 온도에 미치는 영향이 가장 큰 변수였다. 개방성이 큰 지역은 압축적인 공간에 비해 풍속이 높아 열 이동이 원활히 나타나며(Andreou, 2013), 대류에 의한 열 저감 혜택을 많이 누릴 수 있다(Zhao et al., 2014). 다른 한편으로 개방성이 증가하면 단파복사량에 노출되는 표면이 증가하여 건물이 생성하는 그늘 효과에 의한 열 저감 혜택을 누리지 못할 수 있다(Tan et al., 2013; Wang et al., 2016). 태양복사 변화량이 도시의 열 조절에 미치는 영향을 고려하면 개방성이 중요하게 도출된 것은 매우 자연스러운 결과이다.

이 연구의 결과는 개방성이 증가할수록 여름철 도시의 온도를 낮추는 경향을 보고하지만 개방성의 증가와 온도 저감이 선형관계를 나타내지는 않았다. 개방성이 커질수록 온도 저감량(기울기)이 줄어들어 온도 저감 효과가 낮아지고 있었다. 무엇보다 개방성이 중요한 점은 개방성이 적은 지역에서 온도 증가에 매우 크게 관여하고 있다는 점이다. 이 연구의 결과는 개방성에 의한 온도 증감 효과의 변곡점이 약 0.3에서 나타났다. 이는 지역의 평균 높이 이하 공간의 30%가 개방되어 있지 않으면 온도가 증가하는 데 상당한 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 개방성은 겨울철에는 중요하지 않은 지표로 도출된 것이 특징이다. 공간 높이의 증가는 여름철에 도시의 온도를 저감하는 데 영향을 주고 있었다. 공간 높이는 온도 증감에 미치는 영향이 다양하게 나타난다. 고층 건물이 만드는 그늘 효과(Lai et al., 2019; Shih et al., 2017)와 건물 사이에서 생성된 강한 난기류(Kubota et al., 2008)가 열 쾌적성에 도움을 주지만, 단파복사 반사량을 증가시키고(Chatzidimitriou and Yannas, 2015), 장파복사를 가두며(Morakinyo et al., 2016), 내부 풍속을 낮춰 환기 성능을 저하시킴으로써(Schrijvers et al., 2020) 온도를 증가시키기도 한다.

이 연구의 결과는 고층 건물이 만드는 그늘 효과와 환기 성능 향상이 온도를 낮추는 효과가 나머지 온도를 높이는 부정적인 효과보다 크게 작용한다는 것을 보여주었다. 공간의 높이 증가는 겨울철에도 지역의 온도를 낮추는 데 큰 영향을 미치는 것으로 나타난다. 한편, Vertical\_DSM(지형 높이)은 오히려 온도를 증가시키는 요인이었으며, 이는 선행연구의 결과를 지지한다. 지형 높이는 지표면 온도를 예측하는 데 매우 중요한 요인이며(Equere et al., 2021), 고도의 증가가 식생, 반사율 등의 요인에 의해 LST(land surface temperature)를 증가시킨다(Mathew et al., 2016).

Variance(높이 변위)와 Volume(건물 체적)은 여름철 대기 온도를 증가시키는 데 영향을 미쳤으나 중요도가 크지는 않았다. 높이 변위는 L자 형태로 값이 증가함에 따라 온도를 증가시키는 경향을 보인다. 높이 변위가 10m 이하에서는 온도 증감에 미치는 영향의 분포가 매우 다양하게 나타나 다른 요인으로 인한 영향이 더 크게 작용하고 있음을 보여준다. 그러나 높이 변위가 10m를 넘어가기 시작하면 꾸준히 증가하는 패턴을 보여준다. 높이 변위의 증가는 지역의 스카이라인에 의한 거칠기가 증가한다는 의미이므로 거칠기 증가로 인한 환기 성능 저하가 온도 증가에 원인이 되었을 것이다(Oke, 1988; Li et al., 2020). 변위는 겨울철에도 큰 특징을 보이지 않고, 10m를 기준으로 약간 상승하는 L자 추세를 보이며, 변위 10m 이하에서 여름보다 온도 상승 영향이 다양하게 나타난다.

건물 체적은 온도를 증가시키는 경향이 발견되었지만 체적의 크기에 따라 패턴이 분산되고 있었다. 일정 체적(1 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)을 넘어서면서 일부 지역은 온도의 증가가 급증하는 반면, 일부 지역의 온도 증가는 완만한 형태를 보인다. 이는 오로지 체적변수가 미치는 영향보다는 다른 변수에 의한 영향이 더 크게 작용하고 있음을 의미하므로 변수 간의 상호 관계를 통해

이해하는 것이 바람직하다. 건물 체적은 도시의 열 흡수용량의 증가와 관련이 있다(Grimmond and Oke, 1999). 체적이 온도에 주는 영향의 크기도 매우 낮게 나타나므로 도시의 열 조절에 있어 열 흡수 용량에 의한 효과는 미미한 것으로 이해할 수 있다. 한편 겨울철에는 건물 체적이 대기 온도에 영향을 미치는 가장 중요한 변수로 도출되었다.

공간의 밀도가 온도에 미치는 영향과 관련하여 이 연구의 결과는 기존 연구(Li et al., 2020; Chapman et al., 2017)의 결과를 지지한다. 대표적으로 Li et al. (2020)는 단핵 도시를 대상으로 밀도가 높은 도시에서 열섬 효과의 강도가 더 뚜렷하고 밀도가 낮은 도시는 열섬 효과 강도가 감소하는 선형 관계를 발견하였다. 다만, 기존의 많은 연구와 같이 체적을 공간의 밀도와 동일시하여 체적의 증가를 공간의 온도를 증가시키는 주요한 원인으로 지목했다면 우리 연구는 체적이 공간의 밀도를 대리하는 유일한 변수가 아니라는 것을 보여준다. 우리 연구는 온도에 영향을 미치는 건물 체적의 중요도가 낮게 도출되었다.

이 연구의 결과는 공간 밀도와 온도의 관계에서 공간 밀도는 단지 건물 체적이 아니라 개방성과 건물 높이의 상호 관계에 의해 이해되어야 함을 보여주었다. 예컨대, 고층건물 밀집지역은 저층건물 밀집지역에 비해 총 건물 체적은 높지만 오히려 온도는 낮은 편에 속하였다. 체적이 온도 증가에 미치는 영향에 비해 적절한 개방성에 의한 환기 성능 향상 및 고층 건물에 의한 그늘 효과의 증가로 저감된 온도가 더 컸기 때문이다. 이는 고층건물 밀집지역의 낮은 공간 밀도와 관련이 있다. 로컬 기후가 균형을 이루는 UCL 아래 공간에서 고층건물 밀집지역의 단위부피당 건물 밀도는 저층건물 밀집지역에 비해 더 낮게 나타날 수 있다. 이는 공간 밀도가 체적이 아닌 높이와 개방성에 의해 규정되어야 함을 의미한다.

건물의 높이와 개방성은 서로 직접적인 관계가 있다. 실제 도시에서 건물의 높이가 증가하면 해당 지역의 허용 용적률에 따라 건축 면적이 줄어들어 건물 사이 거리가 멀어지므로 개방성은 좋게 나타날 수 있다. 이 연구의 결과는 개방성과 공간의 높이 증가가 모두 온도를 저감하는 데 영향을 미치는 것으로 나타나므로 개방성과 공간 높이 간에 최적의 타협 지점을 찾는 것이 중요함을 시사한다. 일부 시뮬레이션 연구에서 건물 높이 증가에 따른 건물 체적의 증가를 도시의 열섬 효과 강도 증가를 설명하는

주요한 원인으로 지목하며, 건물 높이 증가와 온도 증가를 선형 관계로 이해하지만(Li et al., 2020), 이는 공간 밀도의 오해에서 비롯된 해석이다. 건물의 높이 증가가 곧 공간의 밀도 증가를 의미하지 않으므로 공간의 밀도는 개방성과 높이를 함께 고려하는 것이 바람직하다.

수평 도시형태 변수인 Density(불투수면적비율)는 수직 도시형태 변수를 포함하여 모든 도시형태 변수 중 가장 중요하게 도출되었다. 불투수면적비율의 증가는 도시화 지역과 비도시화 지역의 온도 차이를 의미하는 열섬 효과 강도와 깊은 관련이 있다. 불투수 면적이 증가하면 공간의 열 저장량 증가(Grimmond and Oke, 1999; Santamouris, 2013), 단파복사 반사에 의한 가열(Chatzidimitriou and Yannas, 2015), 환기 성능 저하(Buccolieri et al, 2010; Schrijvers et al., 2020), 잠열 감소 및 현열 증가(Oke et al., 2017; Taha et al., 1988)를 통해 온도 변화에 부정적인 영향을 미친다. 반대로 이 결과는 투수면적을 증가시키는 것이 도시의 온도를 낮추기 위한 가장 좋은 전략이라는 의미로 받아들여질 수 있다. 투수면적은 녹지와 하천을 의미하며, 열섬 효과 강도 저감, 폭염 완화, 그리고 기후변화 완화에 활용할 수 있는 환경적 자산이다(Gill et al., 2007).

겨울은 대체적으로 여름에 비해 영향력의 방향이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 눈에 띄는 점은 여름에 가장 중요하게 나타났던 개방성이 겨울에는 중요하지 않았고, 여름에는 덜 중요하게 나타났던 체적과 PM<sub>2.5</sub>가 겨울에는 중요한 변수로 도출된 점이다. 건물의 증가로 인해 늘어난 도시의 열 흡수용량 증가가 겨울에는 도시 온도 증가에 미치는 데 효과가 있음을 보여준다. 이는 높이, 개방성, 체적의 관계를 고려할 때 개방성이 좋은 고층건물 조성지역이 겨울철 열 환경에는 유리할 수 있음을 의미한다.

도시의 대기오염물질 농도의 증가가 온도에 미치는 영향을 고려하면 겨울에 PM<sub>2.5</sub>가 중요하게 도출된 것은 놀라운 일이 아니다. 대기오염물질은 단파복사를 저장하는 열 흡수원이기도 하면서 장파복사를 반사하여 대기 안에 가두는 역할을 하며 도시의 온도를 증가시킨다(Memon et al., 2008). 특히 PM<sub>2.5</sub>는 열섬 효과를 증가시키는 주요한 원인으로 알려져 있어(Ngarambe et al., 2021) 겨울철 도시의 온도 완화에 도움이 될 수 있지만 PM<sub>2.5</sub>가 폐와 심장 질환의 원인이 되어 도시민의 건강을 위협하는 물질이라는 것을 기억할 필요가 있다(Cohen et al., 2017).

入0]	여름		겨울	
순취	변수	영향	변수	영향
1	상대습도	+	PM <sub>2.5</sub>	+
2	Density	+	Design	+
3	Vacant	-	Volume	+
4	Design	-	Vertical (DSMnG)	-
5	Vertical (DSMnG)	-	Density	+
6	Vertical (DSM)	+	Vertical (DSM)	-
7	Variance	+	Diversity (Entropy)	+/-
8	Volume	+	Vacant	-
9	Diversity (Entropy)	+	Variance	+
10	Diversity (Blue)	-	Diversity (Blue)	-
11	PM <sub>2.5</sub>	+/-	상대습도	+/-

[표 6-1] 여름과 겨울 모형의 변수 영향력 결과

#### 제 2 절 도시형태 지표의 상호작용

수직 도시형태가 도시 기후에 미치는 영향을 살펴보기 위한 이 연구의 두 번째 질문은 연구에서 제안한 수직 도시형태 지표의 상호작용 효과를 살펴보는 것이다. 이를 위해 수직 도시형태를 중심으로 1) 개방성과 공간 높이, 2) 개방성과 체적, 3) 공간 높이와 높이 변위 간의 관계를 논의하였다. 세 가지 변수 간의 관계는 도시의 수직 도시형태에 관한 새로운 함의를 준다.

앞서 제1절에서 공간 밀도의 개념에 있어 개방성과 공간 높이를 고려하는 것의 중요성을 살펴보았다. 두 변수는 여름에 도시 온도에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이었으며, 실제로 개방성과 공간의 높이 간의 상호작용이 눈에 띈다. [그림 6-1]은 개방성 정보를 포함한 공간 높이에 대한 SHAP dependence plot이다. 개방성의 크기에 따라 점의 색이 구분되어 있다. 개방성이 높은 지역(빨간 점)과 낮은 지역(파란 점)의 추세가 구분된다. 추세를 보다 자세히 살펴보기 위해 평균 개방성을 기준으로 개방성이 평균 이하인 지역을 [그림 6-2], 개방성이 평균 이상인 지역을 [그림 6-3]로 구분하였다.



개방성이 평균 이하인 지역과 개방성이 평균 이상인 지역의 공간 높이에 대한 민감도가 다르게 나타났다. 전자가 후자에 비해 높이에 더 민감하게 반응하였는데, 개방성이 평균 이하인 지역은 공간 높이에 대한 SHAP value 산포도 추세가 음의 기울기를 가진 로그함수곡선이었으며([그림 6-2]), 개방성이 평균 이상인 지역은 공간 높이에 대한 SHAP value 산포도 추세가 음의 기울기를 가진 선형 추세로 나타났다([그림 6-3]). 온도의 높이에 대한 민감도는 공간 높이가 낮을수록 차이가 분명했다. 개방성이 적은 지역은 개방성이 충분한 지역에 비해 공간 높이가 낮아지면 온도 증가에 미치는 영향이 급격하게 증가하였다.

로컬 규모에서 나타나는 여름철 온도는 개방성과 공간 높이의 관계를 통해 새로운 통찰을 얻을 수 있다. 먼저, 공간의 높이가 낮은 지역에서는 개방성을 확보하면 공간의 온도가 덜 증가될 가능성이 있다. 연구의 결과는 공간의 평균높이 약 10m 이하에서 개방성이 평균 이하인 지역의 공간 온도가 급격히 상승하고 있음을 보여준다. 그러므로 이 지역에서 개방성을 평균(41.3%) 이상 확보할 수 있다면 공간 온도의 급격한 상승을 막는 데 도움이 될 수 있다. 반면, 공간의 평균높이가 약 10m 이상인 지역에서는 개방성의 크기에 상관없이 공간 높이에 따른 온도 저감 추세가 비슷하게 나타나므로 공간 높이를 보다 중요한 조건으로 보는 것이 바람직하다.

개방성과 건물 체적의 관계도 개방성이 낮은 지역에서 체적 크기에 따라 온도에 미치는 영향이 민감하게 반응한다. [그림 6-4]는 개방성 정보를 포함한 공간 체적에 대한 SHAP dependence plot이다. 개방성의 크기에 따라 점의 색이 구분되어 있다. 개방성이 높은 지역(빨간 점)과 낮은 지역(파란 점)의 추세가 구분된다. 추세를 보다 자세히 살펴보기 위해 평균 개방성을 기준으로 개방성이 평균 이하인 지역을 [그림 6-5], 개방성이 평균 이상인 지역을 [그림 6-6]으로 구분하였다.



건물 체적의 SHAP value 기울기는 개방성에 따라 추세가 다르게 나타났다([그림 6-4]). 개방성이 평균 이하인 지역([그림 6-5])은 평균 이상인

지역([그림 6-6])에 비해 건물 체적에 따른 온도 변화가 컸다. 특히, 개방성이 평균 이하인 지역은 온도 증가 추세가 두 그룹으로 나뉘어져 온도가 매우 급격히 증가하는 그룹이 발견된다. 이는 개방성 외에 체적과 상호작용하여 온도에 영향을 미치는 변수가 있음을 의미한다. 이 연구에서는 발견되지 못하였으므로 추후 연구를 통해 살펴볼 필요가 있다.

온도의 급격한 상승이 일어나는 지역은 개방성이 평균 이하이며, 건물의 체적이 낮은 지역이다. 개방성이 낮으므로 건물 밀집도는 높을 것이며, 건물 체적이 낮으므로 건물의 높이는 낮게 나타날 것이다. 이를 통해 이 지역은 저층 건물 밀집 지역으로 추정할 수 있다. 저층 건물이 밀집한 지역은 그늘이 없고 환기 성능이 열악하여 온도 증가 영향이 높게 나타날 것이다. 개방성과 공간 높이의 관계와 마찬가지로 개방성과 체적의 관계에서도 개방성을 확보하는 것이 중요하게 드러났다. 평균 이상의 개방성을 확보한 지역은 체적과 SHAP value 추세선의 기울기가 평균 이하 지역에 비해 완만하므로 온도가 상대적으로 덜 증가할 것이다.

이 지역에서 개방성을 높이기 위한 방법은 건물의 높이를 증가시키는 것이다. 건물의 높이가 증가하면 용적률에 의해 건축면적이 줄어들어 건물 사이 간격을 확보함으로써 개방성이 증가될 수 있다. 건물의 높이 증가는 건물 체적의 증가로 이어질 수 있지만 건물 체적이 온도 증가에 미치는 영향이 공간 높이가 온도를 저감하는 영향이 비해 낮은 수준이므로 온도 증감의 총 합을 계산하면 결국 온도를 저감할 것이다.

건물의 높이 변위는 개방성과 공간 높이와의 상호작용을 통해 새로운 함의를 발견할 수 있다. 개방성이 낮은 지역은 대부분 건물의 높이차이가 낮게 나타나고, 온도를 증가시키는 요인으로 작용하는 반면, 건물의 높이차이가 큰 지역의 대부분은 개방성이 높은 지역에 포함되어 있고 온도를 낮추는 요인으로 작용하고 있다([그림 5-10(a)]). 이는 건물의 높이차이를 증가시키면 지역의 개방성을 증가시킬 수 있다는 의미가 될 수 있다. 일반적으로 동일한 용적률 규칙이 적용 받는 도시에서 일부 건물의 높이가 증가하면 상대적으로 건축면적이 줄어들게 되므로 건물 사이 간격을 확보할 수 있게 된다([그림 3-3]).

또한, 건물의 높이 차이가 큰 지역은 공간 높이가 동일한 지역에서 건물의 높이 차이가 작은 지역에 비해 온도가 덜 증가하는 경향이 나타난다.

[그림 6-7]은 공간 높이 차이 정보를 포함한 공간 높이에 대한 SHAP dependence plot이다. 건물 높이차이가 큰 지역(빨간 점)과 적은 지역(파란 점)의 추세가 차이를 보인다. 추세를 보다 자세히 살펴보기 위해 건물 높이차이의 평균을 기준으로 평균 이하인 지역을 [그림 6-8], 평균 이상인 지역을 [그림 6-9]에 표기하였다.



=

[그림 6-7] 공간높이에 대한 SHAP dependence plot



SHAP value 산포도



[그림 6-9] 건물 높이차이가 평균 이상인 SHAP value 산포도

건물 높이차이가 평균 이하인 지역의 추세선은 y = -0.00012x + 0.00122 이고, 평균 이상인 지역은 y = -0.00010x + 0.00093 으로 나타나 평균 이하인 지역이 높이에 보다 민감한 것으로 나타난다. 눈에 띄는 점은 평균 이상인 지역의 분포는 보다 선형 추세에 가깝지만 평균 이하 지역은 온도가 증가하는 분포가 훨씬 더 다양하고 크게 나타난다는 점이다. 이 연구의 결과에 따르면 공간 높이 약 5~10m에서 차이가 두드러지게 나타난다. 이는 공간 높이가 약 5~10m인 지역에서 건물의 높이 차이를 다양하게 하는 것이 온도를 덜 증가시킬 가능성이 높고, 온도 조절을 관리하기에 용이하다고 해석할 수 있다.

## 제 3 절 도시형태 유형

수직 도시형태가 도시 기후에 미치는 영향을 살펴보기 위한 이 연구의 세 번째 질문은 계절 효과를 고려하여 로컬 규모에서 나타나는 도시형태 유형의 효율적인 온도 조절 전략을 파악하는 것이다. 군집 분석 결과 로컬 규모의 지역 표본은 수직 도시형태에 의해 다섯 가지 유형으로 나뉘었다. 다섯 가지 도시형태 유형은 기하학적 특징이 다르게 나타나 유형 간의 공간 이질성이 확인되었으며, 여름과 겨울의 결과가 다르게 나타났다. 군집 1과 군집 2는 전체 모형과 동일하게 여름철에 개방성이 중요하게 도출되었으나 군집 3은 공간 높이가 가장 중요했다. 군집 4와 군집 5는 개방성도 중요했지만 수평 도시형태 변수인 불투수포장비율이 가장 중요했다. 군집별 도시형태 특성은 [표 6-2]~[표 6-6]에 요약되어 있다.

높이가 일정한 저층 건물 밀집지역(군집 1)에서는 개방성이 가장 중요한 변수였다. 이 지역에서 낮은 개방성은 대체로 여름철에 지역의 온도를 높이는 데 영향을 미쳤다. 낮은 개방성은 공간 높이가 낮고 건물 밀집도가 높은 데서 연유한다. 공간의 높이가 낮으면 건물에 의해 만들어지는 그늘 효과를 누릴 수 없고(Loughner et al., 2012), 높은 건물 밀집도가 환기효율을 저하시키므로(Buccolieri et al., 2010) 온도가 증가한다. 연구에서 도출한 개방성과 공간의 높이 및 건물 높이 차이의 상호영향을 고려하면 일부 건물의 높이를 높여 공간 밀도를 낮춤으로써 지역의 온도를 저감할 수 있을 것이다. 한편 건물의 높이 증가에 따른 건물 체적 증가는 오히려 겨울에 해당 지역을 따뜻하게 할 수 있으므로 계절 효과를 고려해도 긍정적인 대안이라고 할 수 있다.

작은 하천에 인접한 저층 및 중층 건물 밀집지역(군집 2)은 하천의 개방성이 주는 환기 성능 향상을 유지 및 활용하는 방향으로 수직 형태를 조성하는 것이 바람직하다. 군집 1에 비해 건물 높이 증가에 의한 혜택을 누리기 어렵고, 건물 높이 변위의 증가도 대부분 온도를 증가하는 방향으로 작용하므로 건물의 높이 증가는 이 지역의 기후를 완화하기 위한 바람직한 대안이라고 할 수 없다. 따라서, 이 지역은 수 공간의 혜택을 최대한 누릴 수 있는 방식으로 수직 도시형태의 개선을 고민할 필요가 있다. 수 공간은 열 에너지를 시스템 외부로 방출하고, 열 용량이 크며, 증발 잠열에 의한 냉각

효과가 커(Coutts et al., 2012; Hathway and Sharples, 2012; Manteghi et al., 2015) 오랫동안 도시 열 저감에 효과적인 요소였다(Coutts et al., 2012). 특히, 수 공간과 연결된 환기 통로는 수변 인접 지역의 온도를 저감하는 효과적인 공간 배치 전략이 될 수 있다(Jang et al., 2021). 이는 이 지역은 수 공간으로부터 불어오는 바람이 도시 내부로 원활히 도달하도록 수변 공간의 건물의 배치를 통한 개방성을 확보하는 것이 바람직한 대안이라는 것을 의미한다.

다양한 높이의 중층 및 고층 건물이 밀집한 지역(군집 3)은 공간의 높이가 가장 중요한 변수였다. 열대 지역에서 다양한 건물 높이를 가진 도시 협곡은 그늘 효과와 더 나은 환기성능을 통해 높이가 일정한 협곡에 비해 쾌적한 열 환경을 제공하였다(Sharmin et al., 2017). 이 연구에서도 건물의 높이는 열 환경을 재선하는 주요한 요인으로 나타나 이 지역이 그늘 효과에 의한 혜택을 충분히 누리고 있음을 보여준다. 공간의 높이 증가는 체적 및 변위 증가에 의한 온도 증가를 상쇄하는 것 이상으로 도시의 온도를 저감하는 효과가 있었다. 이는 이 지역의 좋은 개방성도 관련이 있다. 비록 높이 변위는 온도를 증가시키는 것으로 나타나지만 건물 사이의 적절한 거리에 의해 환기 성능에 바람직한 종횡비(He et al., 2019)가 형성되었을 가능성이 높다. 즉, UCL 이하에서 낮게 형성되는 공간 밀도가 이 지역의 기후에 도움이 되었을 것이다. 따라서, 이 지역에서 높이 증가는 오히려 기후적으로 나은 선택이 될 수 있으며, 건물 간의 거리를 좁혀 개방성이 낮아지도록 해서는 안 된다. 더불어 건물의 높이 증가는 겨울철에는 체적을 증가시켜 보다 따뜻한 환경을 조성할 수 있다.

개방감이 뛰어난 중층 및 고층 건물 조성지역(군집 4)은 대규모 아파트 단지 지역을 다수 포함하고 있다. 아파트는 건물 사이에 넓은 동간 거리를 확보하고 있으며, 단지 내 조경 수목이 의무적으로 식재되어 있는 것이 특징이다. 건물 사이에 조성된 환기 통로(ventilation corridors)는 열 배출 통로가 되어 해당 지역의 온도 저감에 크게 기여하는 것으로 알려져 있다(Ren et al., 2018). 더불어 단지에 의무적으로 조성된 녹지는 지역의 투수면적 증가와 관련이 있다. 녹지는 그늘 효과(Santamouris, 2014), 단파복사 반사 효과(Taleghani et al., 2014), 증발산 효과(Taha et al., 1998), 광합성을 위한 에너지 소비(Oke, 2002)를 통해 주변 온도를 낮춘다.

또한, 녹지를 통해 조성된 투수포장은 강우를 저장해 유출수를 감소시키고, 증발산을 위한 토양의 수분 함량을 증가시켜 온도를 저감하는 방향으로 영향을 미쳤을 것이다(Gunawardena et al., 2017). 이 지역은 개방성을 훼손하지 않고 투수포장에서 생성되는 냉각효과가 더 많이, 멀리 퍼질 수 있도록 건물의 배치를 고려하는 것이 좋은 기후 완화 전략이 될 것이다.

군집 5는 군집 2에서 확인하였던 수 공간의 온도 완화 혜택과 군집 4에서 살펴보았던 개방감과 투수포장의 이점이 모두 나타나는 지역으로 온도가 가장 낮게 분포하고 있다. 군집 2에 해당하는 지역의 수 공간이 상대적으로 작은 한강의 지천 인접 지역이라면 군집 5에 해당하는 지역은 한강본류 인접 지역으로 나타난다. 상대적으로 큰 수 공간은 작은 수역에 비해 인접한 지역의 온도를 크게 낮추는 경향이 나타나며(Theeuwes et al., 2013), 이 연구의 결과도 선행연구의 결과를 지지한다.



[표 6-3] 군집 2의 도시형태 특성 요약 군집 2: 작은 하천에 인접한 저층 및 Porosity Imperv 중층 건물 밀집지역 Hum 하천의 개방성이 주는 환기 성능 향상을 유지 Road ले 및 활용하는 방향으로 수직 형태를 조성하는 것 Blue osity 름 이 바람직하다. 수 공간과 연결된 환기 통로가 좋은 전략이 될 수 있다. BDV DSM -0.001 0.000 0.001 0.002 SHAP value (impact on model output) BDV Blue Road PM 겨 Imperv 울 DSMnG nnon Humi igosity DSM 0.000 0.002 0.004 0.006 0.0 SHAP value (impact on model output) Variables Property range 2 Temp 27 25 26 28 Vertical 2 H -1 \_DSM 50 100 150 200 250 Vertical • • • 2 ٠ ٠ \_DSMnG 5 10 15 20 25 30 2 H -----٠ ÷ Variance 20 40 60 80 100 120 140 160 • ٠ \*\* 2 Volume 1 4 5 2 3 2 F \_ ٠ Vacant 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 2 Density 0.6 0.2 0.4 0.8 Diversity  $\vdash$ 2 \_Entropy 0.2 0.4 0.6 0.8 Diversity 2 —

eature

eature

0.2

0.3

0.3

0.5

0.4

0.4

0.6

-

\_Blue

Design

0.0

2

0.0

0.1

0.1

0.2

[표 6-4] 군집 3의 도시형태 특성 요약 군집 3: 다양한 높이의 중층 및 고층 건물이 밀집한 지역 DSMnG Roar 공간의 높이가 가장 중요한 변수였다. 공간의 높 Porosity /alue વે 이 증가는 체적 및 변위 증가에 의한 온도 증가 Feature 를 상쇄하는 이상으로 도시의 온도를 저감하였 BDV 름 DSM 으므로 이 지역의 온도 저감을 위한 가장 좋은 대안이 된다. 2 -0.001 0.000 0.001 0.002 0.003 0.004 SHAP value (impact on model output) BDV 겨 Hum eature 울 DSN -0.004 -0.002 0.000 0.002 0.004 0.006 SHAP value (impact on model output) 0.008 Variables Property range 3 Temp 27 25 26 28 Vertical 3 **|** -٠ \_DSM 50 100 150 200 250 Vertical 3 | \_DSMnG 10 15 20 25 30 ------3 H Variance 60 80 100 120 140 160 20 40 + ٠ 3 • ( Volume 1 2 3 4 5  $\vdash$ - + 3 Vacant 0.5 0.2 0.3 0.4 0.6 0.7 0.8 0.9 3 • H Density 0.2 0.6 0.8 0.4 Diversity 3 -\_Entropy 0.2 0.4 0.6 0.8 Diversity 3 Blue 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 3 • H Design 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6

[표 6-5] 군집 4의 도시형태 특성 요약



variables	I Toperty Tange				
Temp	4 25 26 27	28			
Vertical _DSM	4 50 100 150 2	200 250			
Vertical _DSMnG	4 5 10 15 20	25 30			
Variance	4	140 160			
Volume		4 5			
Vacant	4 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7	0.8 0.9			
Density	4 0.2 0.4 0.6	0.8			
Diversity _Entropy	4 0.2 0.4 0.6	0.8			
Diversity _Blue	4 0.0 0.1 0.2 0.3	0.4			
Design	4 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4	0.5 0.6			





## 제 7 장 결론

#### 제 1 절 이론적 기여

지금까지 도시 형태에 관한 논의는 수평적인 형태와 특징을 분석하는 데 주된 관심을 두었다. 도시 형태 이론은 전통부터 현대까지의 도시 형태의 특징을 살펴보면서 이를 몇 가지 수평적인 패턴으로 분류하며 논의를 진행하였다. 이 과정에서 도시가 추구하는 가치(e.g., 종교, 효율성)가 형태를 구분하는 주요한 요인으로 지목되었다. 근대 이후의 도시는 이동성을 도시형태의 중요한 원칙으로 삼았다. 이동성은 도시형태가 기능적으로 효율성을 확보할 수 있도록 도왔다. 자동차의 개발은 이동성이라는 기능적인 측면이 도시형태를 장악하도록 부추기는 수단이 되었다. 개인이 보다 자유롭게 이동할 수 있게 되면서 지역의 용도를 구분하여 효율적으로 토지를 이용하는 것이 가능하게 되었다. 이로 인해 발생한 스프롤과 압축도시의 유익을 비교하고 압축도시에서 발생하는 효용에 대해 논의하는 것은 현재도 도시개발이론의 주요한 주제이다.

수직 도시형태에 관한 논의는 아직 변두리에 머물러 있다. 현대에 들어와 인적 자원의 집적화와 압축도시가 주는 유익이 급격한 도시화를 부추기면서 인구 천만 명이 넘는 메가시티가 등장하기 시작하였다. 메가시티의 등장은 고층 건물의 기하급수적인 증가를 의미하며, 이는 자연스럽게 수직 도시형태에 대한 관심의 증가로 이어졌다. 그러나 수직 도시형태에 대한 현재의 관심은 도시의 사회, 경제, 문화와 같은 정신과 가치에 미치는 영향에 보다 초점을 두고 있다. 최근에는 보다 확장된 개념으로써 입체적 도시형태에 대한 관심이 늘어나고 있지만 여전히 수직 형태에 대한 개념과 측정 도구는 체계적이지 않고, 수직 도시형태의 결과(e.g., 도시기후)에 대한 관심은 초기 수준이다. 그러나 하향식 접근방식에 따라 형성된 전통적인 도시와는 달리 상향식 접근방식을 따르는 현대적 도시의 성장패턴을 식별하기 위해 수직적인 패턴을 확인하는 것이 무엇보다 중요해지고 있다(Herold et al., 2005; Shirowzhan et al., 2018).

도시의 수직적인 매커니즘이 인간과 환경의 상호작용을 반영하는 핵심 속성임에도 불구하고, 지금까지는 도시 규모에서 도시 형태의 수평적인 토지이용의 영향을 식별하는 데 초점을 두었다. 스프롤이 자동차 사용을 증가시키면서 나타난 대기질 악화 문제를 토지이용의 영향을 중심으로 살펴보았다(Frumkin, 2002; Lee, 2019a). 그러면서 자동차 사용을 줄이기 위한 토지이용 전략을 고민하였다. 도시의 온도 역시 수평적인 측면에서 지역의 용도와 토지이용의 영향을 분석하는 데 초점을 두었으며(Kalnay and Cai, 2003), 도시와 시골의 온도 차이를 의미하는 열섬 효과에 집중하였다(Oke, 1973; Zhang et al., 2010).

도시 기후의 수직적 메커니즘을 다룬 연구는 공기역학적인 관점에서 다뤄지기 시작하였다. 공기역학적인 관점은 주로 기후 학자에 의해 주도되었다. 수직 도시형태에 의해 생성되는 대기 경계층과 도시의 기후의 관계를 식별하는 데 집중하였다. 이 과정에서 도시형태는 대기 경계층 내외부에서 일어나는 에너지 교환의 주요한 요인으로 지목되었다. 이에 일부 연구는 수직 도시 형태를 반영한 도시 기하학이 도시 온도에 미치는 영향에 관하여 논의하였지만, 고층 건물이 밀집한 특정 지역을 모사하여 시뮬레이션 연구를 진행하거나 고층 건물의 특성을 나타내는 몇 가지 계산된 변수(i.e., SVF, TSF)에 의존하였다. 시뮬레이션 연구와 같이 수치 모델에 의존하는 결정론적 접근(Deterministic approach)은 이상적인 이론을 바탕으로 모델을 구성하므로 오염물질 거동의 비선형성 및 이질성을 설명하기에 충분하지 않으며, 수치 모델이 통제하는 연구 대상 지역의 크기가 한정적일 수밖에 없다. 따라서 로컬 규모의 수직 도시형태를 고려하여 기후를 살펴보기에는 어려운 측면이 있었다.

최근 연구는 동일한 도시 내에서 지역의 도시 형태에 따라 나타나는 온도(Kim et al., 2019; Equere et al., 2021; J. Zhang et al., 2020)와 오염물질 농도의 차이(Yang et al., 2020; Kim and Gim, 2022)를 보고한다. 컴퓨팅 성능과 데이터 접근성이 향상되면서 로컬 규모에서 도시 형태의 영향을 확인하는 것이 가능해졌다. 수직 및 공간의 특성을 나타내는 지표로서 SVF와 단파복사 노출면적, 지형의 높이, 건물 높이, 건물 부피 밀도, 정면 면적 지수(FAI), 거칠기 길이(Equere et al., 2021; Xu et al., 2017; Zhang et al., 2020)가 변수로 사용되었으며, 지형높이, FAI와 SVF가 높은 설명력을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 노력 덕분에 온도에 미치는 수직 도시형태의 영향이 일부 밝혀졌지만 아직 수직 도시형태를 의미하는

개념과 지표는 부족한 실정이다. 특히 로컬 규모에서 지역 간의 차이를 살펴보기 위한 공간의 압축성에 대한 널리 받아들여지는 지표가 부족하고, 수용가능한 측정 기준이 불일치하다는 도전적인 문제가 남아 있다(Shirowzhan et al., 2018).

이에 이 연구는 수직 도시형태 지표를 체계화하였다. 도시 기후에 미치는 수직 도시형태의 영향을 확인하기 위해 측정 가능한 네 가지 지표를 제안하였다. 네 가지 지표는 수직 도시형태의 본질적인 특성을 나타내는 Vertical, Variance, Volume, Vacant이다. 본질적인 특성은 도시계획과 설계 현장에서 실천적으로 규제되고 재구성하는 것이 가능한 도시형태 측정 지표를 의미한다(Zhou B., et al., 2017). 제안된 네 가지 지표는 도시형태의 그늘, 열 용량, 환기 성능에 영향을 미치는 효과로 도시의 열 에너지 흐름을 조절한다. 네 가지 지표가 가진 본질적인 특성은 지표의 영향력과 효과를 이해하기 쉽게 하며, 측정 및 적용이 용이하여 도시계획과 설계 현장에서 사용하기 적절하다.

두 번째 기여는 제안된 네 가지 지표를 통해 수직 도시형태가 대기 온도에 미치는 개별 및 상호작용 영향을 식별하였다. 수직 도시형태는 그늘, 열 용량, 환기 성능의 개별 혹은 상호작용을 통해 도시의 온도를 조절한다. 수직 도시형태의 상호작용 효과는 도시의 열 에너지 균형과 이동을 공간 이질적이고 복잡하게 만들어 도시형태에 대한 통찰력을 갖기 어렵게 만들었다(Merlier et al., 2018). 이에 이 연구는 도시형태, 특히 수직 도시형태의 개별 및 상호작용 효과를 살펴볼 수 있도록 ANN 모형으로 예측모형을 만들고 모형에서 SHAP value를 산출하였다. 연구의 결과로써 네 가지 수직 도시형태 지표 간의 상호작용을 비교하여 도시형태가 갖는 새로운 함의를 제시하였다.

특히 이 연구는 공간 밀도를 재정의하고, 지역의 공간 밀도를 낮추는 것이 온도 관리를 위한 중요한 지점이라고 주장하였다. 공간 밀도를 형성하는 변수인 개방성과 높이는 여름 모형에서 가장 중요하게 도출된 두 가지 변수였다. 개방성은 온도 증가, 높이는 온도 감소에 영향을 미치는 주요한 요인이었다. 개방성과 높이의 관계는 도시 온도에 대한 새로운 통찰력을 준다. 개방성이 낮은 지역에서 온도는 높이에 상대적으로 민감하게 반응하므로 지역의 온도를 낮추기 위해 높이를 증가시켜 그늘 효과를

더하거나 개방성을 증가시켜 환기 성능을 향상시키는 것이 바람직하다. 즉, 지역의 공간 밀도를 낮게 유지하거나, 낮아질 수 있도록 지향하는 도시형태가 더 나은 온도 환경을 제공한다.

세 번째 기여는 계절에 따라 수직 도시형태가 미치는 영향의 차이를 확인한 것이다. 여름에는 개방성과 높이가 중요하게 도출되었다면 겨울에는 체적과 높이가 중요하게 도출되었다. 여름에 중요하게 도출되었던 개방성은 겨울에는 중요하지 않게 도출되었으며, 높이 변위는 여름에는 다른 변수와의 상호작용을 통해 중요한 역할이 발견되었지만 겨울에는 뚜렷한 관계가 발견되지 않았다. 이 연구에서 다루는 주요한 변수는 아니지만 겨울에 중요한 변수로 도출된 PM<sub>2.5</sub>의 결과도 눈에 띈다. PM<sub>2.5</sub>는 겨울에 지역의 온도를 증가시키는 두 번째로 중요한 변수였다. 이 결과는 도시 기후에 대한 수직 도시형태의 영향을 고려할 때, 도시민의 건강을 위협하는 PM<sub>2.5</sub>의 영향도 함께 고려하는 것이 중요함을 시사한다.

### 제 2 절 정책적 함의

기후변화에 의한 대기 온도 증가는 도시의 지속가능성을 훼손한다(Chapman et al., 2017; B. Zhou et al., 2017). 여름철 도시 기온의 증가는 온 열 질환 발생과 그로 인한 사망률을 증가시킴으로써 도시민의 건강을 심각하게 위협하고 있다(Heaviside et al., 2017). 도시의 물리적인 형태는 도시의 열 에너지 저장, 이동 및 상태에 영향을 미쳐 열 에너지를 조절하는 주요한 매개체이다. 따라서, 도시의 물리적인 형태를 이해하는 것은 기후변화에 적응하고, 도시민의 건강 위협에 대응하기 위한 새로운 통찰력을 준다.

도시의 토지이용이 도시 기후에 미치는 영향은 도시계획가와 설계자들 사이에서 오랫동안 논의되어 왔다. 도시화로 인한 인위적인 환경이 자연계 작동에 심각한 간섭을 일으키면서 도시 경계 내외부에서 일어나는 입력과 출력 간의 불평형이 발생하였다. 도시화 지역과 주변의 비개발지역 사이에서 나타나는 온도 차이는 열섬 효과라는 이름으로 대표적인 도시화의 기후 영향으로 탐구되고 있다. 대부분의 연구는 녹지 손실에 의한 토지이용 변화와 도시 스프롤과 같이 도시 확장에 초점을 두었다. 그러나 도시의 온도 조절에 대한 통찰력을 갖기 위해서는 도시의 수직 형태를 이해하는 것이 중요하지만 연구가 충분하지 않다.

도시 기후를 조절하는 측면에서 수직 도시형태에 관한 정책적 수단은 아직 충분하지 않다. 1991년 스피로 코스토프의 제안 이후로 도시의 스카이라인이 수직 도시형태를 나타내는 대표적인 요인으로 자리잡았으나 경관관리 측면에서 다루어질 뿐 기후 관리를 위한 실천적인 논의는 부족하다. 수직 도시형태는 도시 온도를 조절하는 주요한 효과인 그늘, 열용량, 환기 성능에 영향을 미치는 주요한 요인이므로 수직 도시형태를 관리하는 일은 경관법이 목적하는 바에 따라 쾌적한 지역 환경을 조성하기 위해 매우 중요한 작업이다.

수직 도시형태를 도시 형태를 결정하는 주요한 요인으로 고려할 때 도시형태 간의 상호작용이 기후에 미치는 영향을 고려해야 한다. 도시형태는 다양한 방식으로 서로 상호작용하면서 균형을 이룬다. 예컨대, 도시형태가 온도에 미치는 영향에 관한 기존 연구 결과는 서로 모순적인 결과를

내놓았다. 일부 연구에서는 넓게 분산된 도시가 오히려 기후적인 측면에서 더 나은 환경을 보인다고 보고하지만(Zhou B et al., 2017), 건물 사이의 넓은 배치는 표면에 흡수되는 단파복사를 증가시켜 도시의 열 환경을 악화하기도 한다(Tan et al., 2013; Wang et al., 2016). 더불어 도시의 집적효과가 주는 혜택을 고려하면 단순히 기후만을 고려하여 도시를 조성할 수 없다. 따라서, 도시의 물리적인 환경이 영향을 미치는 요인 간의 트레이드 오프가 이루어져야 한다.

도시형태는 로컬규모에서 나타나는 도시형태 유형에 따라 온도에 미치는 영향이 다르게 나타나므로 도시형태 유형에 따라 온도 저감을 위한 접근방법이 달라야 한다. 로컬규모에서 도시형태가 만드는 상호작용은 기존 연구에서 제시된 일반화된 연구의 결과를 도시공간에 적용하기 어렵게 만든다. 도시의 물리적인 환경에 대한 변화는 손쉽게 하향식으로 적용할 수 없으므로 신중한 접근이 필요하다. 또한, 자원의 한계가 있으므로 방법의 우선순위를 통해 적용할 필요가 있다. 이에 이 연구에서 제안된 로컬규모의 도시형태 유형은 도시의 더 나은 열 환경 조성을 위한 적절한 대안이 될 것이다.

이 연구의 결과는 UCL 이하에서 공간 밀도를 낮게 유지하는 것이 로컬 규모에서 도시의 온도를 낮추는 좋은 대안이라는 것을 보여주었다. 공간 밀도는 개방성과 높이를 통해 조절할 수 있다. 개방성은 로컬 규모에서 도시의 열을 조절하는 가장 주요한 변수였다. 개방성은 온도 저감보다 온도 증가에 미치는 영향이 매우 크게 나타났다. 온도에 미치는 영향이 로그함수곡선을 그려 개방성이 낮아질수록 온도 증가에 미치는 영향이 급격히 증가하였다. 개방성 증가가 가장 필요한 지역은 이 연구에서 도출한 도시형태 유형 중 높이가 일정한 저층 건물 밀집 지역이다. 도시계획과 설계 가이드라인을 통해 이 지역의 거리 협곡 종횡비를 통제하여 일정 수준 이상의 개방성을 확보할 수 있도록 해야 한다.

개방성과 공간의 높이와의 상호작용은 주목할 만하다. 개방성이 표본 평균(41.3%) 이하인 지역은 대기 온도가 높이에 민감하게 반응하였는데, 높이가 낮을수록 온도 증가에 미치는 영향이 급격히 증가하였다. 연구의 결과가 제시하는 공간 높이는 10m이다. 따라서, 지역이 보다 나은 열 환경을 갖기 위해서는 로컬 규모에서 공간의 평균 높이가 10m를 초과하거나

공간의 개방성이 41.3%를 초과하도록 설계하는 것이 바람직하다. 용적률에 따라 건물의 높이를 높이고 건폐율을 낮추는 방향으로 개방성을 확보할 필요가 있다.

이 연구는 여름과 겨울 모형을 달리 구성하여 수직 도시형태가 온도에 미치는 영향을 살펴보았다. 겨울에는 도시형태를 통해 지역을 따뜻하게 유지하는 것이 열 쾌적성이 더 나은 환경을 조성하는 방법이 될 수 있다. 수직 도시형태가 여름과 겨울에 미치는 영향의 크기나 방향이 각각 다르므로 두 계절에 모두 긍정적으로 작용할 수 있는 변수를 선택하는 것이 중요하다. 이 연구의 결과를 통해 지역의 건물 체적을 증가시키되 평균 이상의 개방성을 확보한다면 여름에는 온도가 덜 올라가고, 겨울에는 덜 떨어지는 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

한 가지 주의해야 할 점은 겨울 모형에서 PM<sub>2.5</sub>의 영향력이 매우 높게 도출되었다는 점이다. 겨울철에 증가하는 PM<sub>2.5</sub> 농도는 지역의 온도를 증가시켜 열적으로 쾌적한 환경을 조성하도록 돕는다. 그러나 PM<sub>2.5</sub>는 폐와 심혈관 질환을 일으켜 도시민의 건강을 위협하는 대기오염물질이다(Kappos et al., 2004; Xing et al., 2016). 도시형태에 의해 조절된 환기 성능은 PM<sub>2.5</sub> 농도와 밀접한 관련이 있으므로(Gao et al., 2021; Kim and Gim, 2022) 도시형태와 PM<sub>2.5</sub> 농도의 관계를 살펴보는 일은 매우 중요하다. 따라서, 도시형태에 관한 계획과 설계 관점에서 온도와 대기오염물질에 미치는 영향을 동시에 고려해야 한다.

## 제 3 절 연구의 한계

이 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 온도 측정 센서에 대한 통제의 한계이다. 이 연구에서 종속변수로 사용된 S-DoT는 서울시에서 자체적인 설계 기준에 따라 설치하고 관리되는 데이터이다. 연구자가 설치에 관여하지 못하므로 관측소가 설치된 위치, 설치 높이 및 센서 외부 환경 기준(예컨대, 설치 인접 지역에 에어컨 실외기와 같은 인위적인 열원의 존재)의 일치 여부를 구체적으로 확인하기 어려웠다. 또한, 시간 단위 시계열 데이터이지만 기기 및 측정 오류를 처리하는 과정에서 시계열 데이터를 온전히 활용하지 못하게 되어 횡단 연구로 진행하게 된 점이 아쉽다. 시간에 따른 수직 도시형태의 영향(e.g., 열대야)을 보다 구체적으로 살펴보기 위해서는 데이터 센서 인프라의 고도화 및 관리 시스템의 구축이 필요해 보인다.

둘째, 사용한 수직 도시형태 데이터 품질에 한계가 있다. 이 연구는 수직 도시형태의 양적 크기에 초점을 맞추어 질적 수준을 고려하지 못하였다. 건축 면적이 높이에 획일적으로 반영되어 체적이 계산되었고, 건물과 지붕의 디자인, 재질과 같이 열 조절에 미치는 영향이 온전히 반영되지 못하였다. 또한, 녹지의 질과 다양성(e.g., 교목 혹은 관목)도 온도에 미치는 영향이 다르지만 연구에서는 투수표면으로 일괄 반영되었다.

셋째, PM<sub>2.5</sub> 이외에 대기오염물질의 영향을 구체적으로 살펴보지 못하였다. 대기오염물질은 단파복사와 장파복사에 노출되어 열 흡수 및 반사함으로써 도시 온도 증가에 영향을 미친다(Memon et al., 2008). 연구에서는 측정 데이터의 한계로 겨울철에 깊이 상관하는 PM2.5의 영향은 살펴보았지만, SO2, O3와 같이 열섬 효과와 강한 상관관계를 보이는 대기오염물질(Ngarambe et al., 2021)과 수직 도시형태와의 관계를 살펴보지 못하였다. 추후 연구를 통해 도시형태, 대기오염물질, 온도의 상관관계를 탐구해야 한다.

# 부록 I. 군집 성능 검증

Vertical factor — Vertical<sub>DSM</sub>

[그림 I-1]은 Vertical<sub>DSM</sub> 변수의 군집별 커널 밀도 그래프와 박스 플랏을 보여준다. 군집 간 데이터의 평균이 서로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 먼저 그룹별 정규성 검정을 시행하였다. 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test)을 수행한 결과 모든 군집이 정규성 가정을 위배하여 비모수 대안인 크루스칼-왈리스 검정(Kruscal-Wallis)을 실시하였다. 크루스칼-왈리스 검정 결과 카이제곱이 75.107(p-value<0.05)로 도출되어 "군집 간 지형높이를 고려한 평균 높이에는 차이가 없다"는 귀무가설이 기각되었다([표 I-1]).

크루스칼-왈리스 검정에 따라 군집 간 차이가 유의한 것으로 도출되었으므로 본 페르니 교정(Bonferonni correction)을 사용한 던 검정(Dunn's test)을 실시하였다. 검정 결과 군집 1과 3, 1과 5, 군집 3과 5는 p-value가 0.05를 초과하여 통계적으로 유의하지 않았으며 그 외 다른 집단 간의 차이는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다([표 I-2]).



[그림 I-1] 군집별 Vertical<sub>DSM</sub> 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)

군집	Shapir	o-Wilk	Kruscal-Wallis			
	statistic	p-value	statistic	p-value		
1	0.922	6.179e-15				
2	0.953	0.002		1.892e-15		
3	0.972	0.001	75.107			
4	0.904	1.801e-10				
5	0.818	9.196e-05				

[표 I-1] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과

[표 I-2] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-values)

군집	1	2	3	4	5
1	1.0				
2	5.945e-08	1.0			
3	1.0	1.307e-05	1.0		
4	8.411e-06	1.148e-16	0.0002	1.0	
5	1.0	0.003	1.0	0.899	1.0

Vertical factor — Vertical<sub>DSMnG</sub>

[그림 I-2]는 Vertical<sub>DSMnG</sub> 변수의 군집별 커널 밀도 그래프와 박스 플랏을 보여준다. 군집 간 데이터의 평균이 서로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 먼저 그룹별 정규성 검정을 시행하였다. 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test)을 수행한 결과 군집 5를 제외한 모든 군집이 정규성 가정을 위배하여 비모수 대인안 크루스칼-왈리스 검정(Kruscal-Wallis)을 실시하였다. 크루스칼-왈리스 검정 결과 카이제곱이 115.022(pvalue<0.05)로 도출되어 "군집 간 평균 높이에는 차이가 없다"는 귀무가설이 기각되었다([표 I-3]).

크루스칼-왈리스 검정에 따라 군집 간 차이가 유의한 것으로 도출되었으므로 본 페르니 교정(Bonferonni correction)을 사용한 던 검정(Dunn's test)을 실시하였다. 검정 결과 군집 1과 2, 1과 4, 1과 5, 군집 2와 4, 2와 5, 군집 4와 5는 p-value가 0.05를 초과하여 통계적으로 유의하지 않았으며 그 외 다른 집단 간의 차이는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다([표 I-4]).



[그림 I-2] 군집별 Vertical<sub>DSMnG</sub> 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)

[표]	I-3] S	Shapiro-Wilks	- Kruscal-Wallis	검정	결과
-----	--------	---------------	------------------	----	----

군집	Shapir	Shapiro-Wilk		l-Wallis	
	statistic	p-value	statistic	p-value	
1	0.964	9.338e-10		6.173e-24	
2	0.882	3.455e-07			
3	0.979	0.008	115.022		
4	0.935	4.258e-08			
5	0.907	0.010			

[표 I-4] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-values)

군집	1	2	3	4	5
1	1.0				
2	1.0	1.0			
3	3.933e-18	1.845e-10	1.0		
4	0.514	1.0	2.047e-19	1.0	
5	0.0846	0.444	5.111e-10	0.907	1.0

#### Variance factor – Variance

[그림 I-3]은 Variance 변수의 군집별 커널 밀도 그래프와 박스 플랏을 보여준다. 군집 간 데이터의 평균이 서로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 먼저 그룹별 정규성 검정을 시행하였다. 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test)을 수행한 결과 모든 군집이 정규성 가정을 위배하여 비모수 대인안 크루스칼-왈리스 검정(Kruscal-Wallis)을 실시하였다. 크루스칼-왈리스 검정 결과 카이제곱이 439.878(p-value < 0.05)로 도출되어 "군집 간 지역의 Variance에는 차이가 없다"는 귀무가설이 기각되었다([표 I-5]).

크루스칼-왈리스 검정에 따라 군집 간 차이가 유의한 것으로 도출되었으므로 본 페르니 교정(Bonferonni correction)을 사용한 던 검정(Dunn's test)을 실시하였다. 검정 결과 군집 1과 4, 군집 2와 5, 군집 4와 5는 p-value가 0.05를 초과하여 통계적으로 유의하지 않았으며 그 외 다른 집단 간의 차이는 통계적으로 유의하였다([표 I-6]).



[그림 I-3] 군집별 Variance 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)

군집	Shapir	Shapiro-Wilk		l-Wallis	
	statistic p-value		statistic	p-value	
1	0.955	3.326e-11			
2	0.720	3.091e-12			
3	0.888	2.608e-10	439.878	6.698e-94	
4	0.966	5.264e-05			
5	0.453	8.186e-10			

[표 I-5] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과

[표 I-6] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-values)

군집	1	2	3	4	5
1	1.0				
2	2.572e-27	1.0			
3	3.342e-81	0.004	1.0		
4	0.024	1.372e-14	5.494e-44	1.0	
5	2.218e-05	0.720	0.0002	0.012	1.0

*Volume factor* — *Volume* 

[그림 I-4]는 Volume 변수의 군집별 커널 밀도 그래프와 박스 플랏을 보여준다. 군집 간 데이터의 평균이 서로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 먼저 그룹별 정규성 검정을 시행하였다. 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test)을 수행한 결과 군집 1과 4를 제외한 군집 2, 3, 5가 정규성 가정을 위배하여 비모수 대인안 크루스칼-왈리스 검정(Kruscal-Wallis을 실시하였다. 크루스칼-왈리스 검정 결과 카이제곱이 375.525(pvalue<0.05)로 도출되어 "군집 간 건물의 체적에는 차이가 없다"는 귀무가설이 기각되었다([표 I-7]).

크루스칼-왈리스 검정에 따라 군집 간 차이가 유의한 것으로 도출되었으므로 본 페르니 교정(Bonferonni correction)을 사용한 던 검정(Dunn's test)을 실시하였다. 검정 결과 군집 1과 2, 군집 4와 5는 pvalue가 0.05를 초과하여 통계적으로 유의하지 않았으며 그 외 다른 집단 간의 차이는 통계적으로 유의하였다 ([표 I-8]).



[그림 I-4] 군집별 Volume 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)
	1 .				
그지	Shapir	o-Wilk	Kruscal-Wallis		
七省	statistic p-value		statistic	p-value	
1	0.998	0.940			
2	0.885	4.497e-07			
3	0.868	2.311e-11	375.525	5.392e-80	
4	0.993	0.423			
5	0.598	3.581e-08			

[표 I-7] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과

[표 I-8] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-values)

군집	1	2	3	4	5
1	1.0				
2	0.537	1.0			
3	3.787e-29	1.085e-20	1.0		
4	6.123e-24	3.037e-06	1.835e-75	1.0	
5	4.694e-10	1.396e-05	2.630e-29	0.608	1.0

Volume factor — Vacant

[그림 I-5]는 Vacant 변수는 군집별 커널 밀도 그래프와 박스 플랏을 보여준다. 군집 간 데이터의 평균이 서로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 먼저 그룹별 정규성 검정을 시행하였다. 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test)을 수행한 결과 군집 1과 4가 정규성 가정을 위배하여 비모수 대안인 크루스칼-왈리스 검정(Kruscal-Wallis)을 실시하였다. 크루스칼-왈리스 검정 결과 카이제곱이 460.105(p-value<0.05)로 도출되어 "군집 간 개방성에는 차이가 없다"는 귀무가설이 기각되었다([표 I-9]).

크루스칼-왈리스 검정에 따라 군집 간 차이가 유의한 것으로 도출되었으므로 본 페르니 교정(Bonferonni correction)을 사용한 던 검정(Dunn's test)을 실시하였다. 검정 결과 군집 2과 3, 군집 3과 4는 pvalue가 0.05를 초과하여 통계적으로 유의하지 않았으며, 다른 군집 간의 차이는 통계적으로 유의하였다([표 I-10]).



[그림 I-5] 군집별 Vacant 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)

[표 I-9] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과

그지	Shapir	o-Wilk	Kruscal-Wallis		
七名	5십 statistic p-value		statistic	p-value	
1	0.981	3.288e-06			
2	0.989	0.591			
3	0.986	0.083	460.105	2.839e-98	
4	0.975	0.001			
5	0.985	0.931			

[표 I-10] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-values)

군집	1	2	3	4	5
1	1.0				
2	1.030e-41	1.0			
3	2.776e-44	0.204	1.0		
4	4.091e-35	4.819e-04	0.425	1.0	
5	6.235e-35	0.002	4.706e-07	3.637e-10	1.0

Density factor — Density<sub>Imperv</sub>

[그림 I-6]은 Density<sub>Imperv</sub> 변수의 군집별 커널 밀도 그래프와 박스 플랏을 보여준다. 군집 간 데이터의 평균이 서로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 먼저 그룹별 정규성 검정을 시행하였다. 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test)을 수행한 결과 군집 1, 3, 4가 정규성 가정을 위배하여 비모수 대인안 크루스칼-왈리스 검정(Kruscal-Wallis)을 실시하였다. 크루스칼-왈리스 검정 결과 카이제곱이 274.994(pvalue < 0.05)로 도출되어 "군집 간 Density<sub>Imperv</sub> 에는 차이가 없다"는 귀무가설이 기각되었다([표 I-11]).

크루스칼-왈리스 검정에 따라 군집 간 차이가 유의한 것으로 도출되었으므로 본 페르니 교정(Bonferonni correction)을 사용한 던 검정(Dunn's test)을 실시하였다. 검정 결과 군집 1과 3은 p-value가 0.05를 초과하여 통계적으로 유의하지 않았으며, 다른 군집 간의 차이는 통계적으로 유의하였다([표 I-12]).



[그림 I-6] 군집별 Density<sub>Imperv</sub> 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)

그지	Shapir	o-Wilk	Kruscal-Wallis			
TA	statistic	p-value	statistic	p-value		
1	0.963	6.655e-10				
2	0.974	0.058				
3	0.968	0.0004	274.994	2.674e-58		
4	0.967	8.13e-05				
5	0.967	0.410				

[王 I-]	11] Shapirc	-Wilk와	Kruscal-'	Wallis	검정	결과
--------	-------------	--------	-----------	--------	----	----

[표 I-12] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-values)

군집	1	2	3	4	5
1	1.0				
2	3.392e-07	1.0			
3	1.0	4.00e-06	1.0		
4	1.124e-36	0.004	2.771e-25	1.0	
5	1.193e-24	2.306e-09	6.620e-23	5.912e-05	1.0

## Diversity factor — Diversity<sub>Entropy</sub>

[그림 I-7]은 Diversity<sub>Entropy</sub> 변수의 군집별 커널 밀도 그래프와 박스 플랏을 보여준다. 군집 간 데이터의 평균이 서로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 먼저 그룹별 정규성 검정을 시행하였다. 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test)을 수행한 결과 군집 5를 제외한 모든 군집이 정규성 가정을 위배하여 비모수 대인안 크루스칼-왈리스 검정(Kruscal-Wallis)을 실시하였다. 크루스칼-왈리스 검정 결과 카이제곱이 21.335(pvalue<0.05)로 도출되어 "군집 간 Diversity<sub>Entropy</sub> 에는 차이가 없다"는 귀무가설이 기각되었다([표 I-13]).

크루스칼-왈리스 검정에 따라 군집 간 차이가 유의한 것으로 도출되었으므로 본 페르니 교정(Bonferonni correction)을 사용한 던 검정(Dunn's test)을 실시하였다. 검정 결과 군집 1과 2, 1과 3, 1과 4, 군집 2와 4, 군집 3과 4, 3과 5는 p-value가 0.05를 초과하여 통계적으로 유의하지 않았으며, 다른 군집 간의 차이는 통계적으로 유의하였다([표 1-14]).



[그림 I-7] 군집별 Diversity<sub>Entropy</sub> 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)

	1				
77]	Shapir	o-Wilk	Kruscal-Wallis		
τų	statistic	p-value	statistic	p-value	
1	0.979	1.557e-06			
2	0.985	0.004			
3	0.936	3.953e-07	21.335	0.0003	
4	0.969	0.0001			
5	0.915	0.015			

[표 I-13] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과

[표 I-14] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-values)

군집	1	2	3	4	5
1	1.0				
2	0.260	1.0			
3	1.0	0.022	1.0		
4	1.0	0.602	1.0	1.0	
5	0.007	0.0002	0.126	0.008	1.0

Diversity factor — Diversity<sub>Blue</sub>

[그림 I-8]은 Diversity<sub>Blue</sub> 변수의 군집별 커널 밀도 그래프와 박스 플랏을 보여준다. 군집 간 데이터의 평균이 서로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 먼저 그룹별 정규성 검정을 시행하였다. 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test)을 수행한 결과 모든 군집이 정규성 가정을 위배하여 비모수 대인안 크루스칼-왈리스 검정(Kruscal-Wallis)을 실시하였다. 크루스칼-왈리스 검정 결과 카이제곱이 560.751(pvalue <0.05)로 도출되어 "군집 간 Diversity<sub>Blue</sub> 에는 차이가 없다"는 귀무가설이 기각되었다([표 I-15]).

크루스칼-왈리스 검정에 따라 군집 간 차이가 유의한 것으로 도출되었으므로 본 페르니 교정(Bonferonni correction)을 사용한 던 검정(Dunn's test)을 실시하였다. 검정 결과 군집 1과 3, 군집 2와 5, 군집 4와 5는 p-value가 0.05를 초과하여 통계적으로 유의하지 않았으며, 다른 군집 간의 차이는 통계적으로 유의하였다([표 I-16]).



[그림 I-8] 군집별 Diversity<sub>Blue</sub> 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)

[표 I-15] Shapiro-Wilk와 Kruscal-Wallis 검정 결과

그지	Shapir	o-Wilk	Kruscal-Wallis			
14	statistic	p-value	statistic	p-value		
1	0.160	3.939e-42				
2	0.884	4.259e-07				
3	0.307	1.546e-25	560.751	4.828e-120		
4	0.764	3.561e-17				
5	0.819	9.612e-05				

[표 I-16] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-values)

군집	1	2	3	4	5
1	1.0				
2	2.449e-83	1.0			
3	1.0	6.440e-58	1.0		
4	2.464e-47	2.477e-14	2.960e-25	1.0	
5	4.286e-18	0.081	3.934e-14	0.227	1.0

## Design factor – Design<sub>Road</sub>

[그림 I-9]는 Design<sub>Road</sub> 변수의 군집별 커널 밀도 그래프와 박스 플랏을 보여준다. 군집 간 데이터의 평균이 서로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 먼저 그룹별 정규성 검정을 시행하였다. 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test)을 수행한 결과 군집 2가 정규성 가정을 위배하여 비모수 대안인 크루스칼-왈리스 검정(Kruscal-Wallis)을 실시하였다. 크루스칼-왈리스 검정 결과 카이제곱이 167.079(p-value<0.05)로 도출되어 "군집 간 Design<sub>Road</sub>에는 차이가 없다"는 귀무가설이 기각되었다([표 I-17]). 크루스칼-왈리스 검정에 따라 군집 간 차이가 유의한 것으로 도출되었으므로 본 페르니 교정(Bonferonni correction)을 사용한 던 검정(Dunn's test)을 실시하였다. 검정 결과 군집 1과 2의 p-value가 0.05를 초과하여 통계적으로 유의하지 않았으며, 다른 군집 간의 차이는 통계적으로 유의하였다([표 I-18]).



[그림 I-9] 군집별 Design<sub>Road</sub> 변수의 커널 밀도 그래프(좌), Box-plot(우)

[표]	-17]	Shapiro-Wilk와	Kruscal-Wallis	검정	결과
-----	------	---------------	----------------	----	----

군집	Shapiro-Wilk		Kruscal-Wallis	
	statistic	p-value	statistic	p-value
1	0.995	0.141		4.430e-35
2	0.937	0.0002		
3	0.996	0.897	167.079	
4	0.990	0.128		
5	0.957	0.225		

[표 I-18] Dunn's test 검정 결과(Bonferonni correction for the p-values)

군집	1	2	3	4	5
1	1.0				
2	0.316	1.0			
3	9.906e-16	0.001	1.0		
4	1.117e-05	2.065e-06	1.725e-27	1.0	
5	9.282e-08	2.875e-09	2.612e-19	0.006	1.0

부록 II. 도시형태 변수의 군집별 분포도



[그림 II-1] 수직 도시형태 변수의 군집별 분포도. (a): 지형높이(Vertical<sub>DSM</sub>), (b): 공간높이(Vertical<sub>DSMnG</sub>), (c): 높이 변위(Variance), (d): 체적(Volume), (e): 개방성(Vacant)



[그림 II-2] 수평 도시형태 변수의 군집별 분포도. (a): 불투수면적비율(Density<sub>Imperv</sub>), (b): 엔트로피(Diversity<sub>Entropy</sub>), (c): 하천면적비율(Diversity<sub>Blue</sub>), (d): 도로면적비율(Design<sub>Road</sub>)

- Adolphe, L. (2001). A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environment and planning B: planning and design, 28(2),* 183-200.
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar energy*, *70*(3), 295-310.
- Alexander, C. (1965). A city is not a tree. Ekistics, 139, 344-348.
- Alexander, C. (1977). A pattern language: towns, buildings, construction. Oxford university press.
- Andreou, E. (2013). Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable energy*, *55*, 182-188.
- Aram, F., García, E. H., Solgi, E., & Mansournia, S. (2019). Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, *5*(4), e01339.
- Aristodemou E, Boganegra LM, Mottet L, et al. (2018) How tall buildings affect turbulent air flows and dispersion of pollution within a neighbourhood. *Environmental Pollution, 233*, 782–796.
- Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3), 245-255.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society, 23(1)*, 1-26.
- Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., ... & Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information fusion*, *58*, 82-115.

- ARUP, (2014). Reducing Urban Heat Risk: A Study on Urban Heat Risk Mapping and Visualisation. (London).
- Bacon, E. N., & Walduck, K. (1967). Design of cities. Penguin Books
- Barlow, J. F. (2014). Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, *10*, 216-240.
- Belcher, S. E. (2005). Mixing and transport in urban areas. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 363(1837), 2947-2968.
- Bereitschaft B and Debbage K (2013) Urban form, air pollution, and CO2 emissions in large U.S. metropolitan areas. *The Professional Geographer, 65(4)*, 612–635.
- Bianco, L., Serra, V., Larcher, F., & Perino, M. (2017). Thermal behaviour assessment of a novel vertical greenery module system: first results of a long-term monitoring campaign in an outdoor test cell. *Energy Efficiency*, 10(3), 625-638.
- Bishop, C. M., & Nasrabadi, N. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning* (Vol. 4, No. 4, p. 738). New York: springer.
- Bottou, L. (2012). Stochastic gradient descent tricks. *Neural networks: Tricks of the trade* (pp. 421-436). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bounoua, L., Zhang, P., Mostovoy, G., Thome, K., Masek, J., Imhoff, M., ... & Toure, A. M. (2015). Impact of urbanization on US surface climate. *Environmental Research Letters*, *10(8)*, 084010.
- Breheny, M. (1996). Centrists, decentrists and compromisers: views on the future of urban form. *The compact city: a sustainable urban form*, 13-35.
- Brown, R. D., & Gillespie, T. J. (1995). *Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency* (Vol. 1). New York: Wiley.
- Bruyns, G. J., Higgins, C. D., & Nel, D. H. (2021). Urban volumetrics: From vertical to volumetric urbanisation and its extensions to

empirical morphological analysis. *Urban Studies*, *58*(5), 922-940.

- Buccolieri, R., Sandberg, M., & Di Sabatino, S. (2010). City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries. *Atmospheric Environment*, *44*(15), 1894-1903.
- Cao, C., Lee, X., Liu, S., Schultz, N., Xiao, W., Zhang, M., Zhao, L., (2016). Urban heat islands in China enhanced by haze pollution. *Nature Communications*, 7(1), 12509.
- Cervero, R. (2002). Built environments and mode choice: toward a normative framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 7(4),* 265-284.
- Cervero, R., & Kockelman, K. (1997). Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation research part D: Transport and environment, 2(3)*, 199-219.
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?–Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development*, 7(3), 1247– 1250.
- Chapman, S., Watson, J. E., Salazar, A., Thatcher, M., & McAlpine, C. A. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, 32(10), 1921-1935.
- Charalampopoulos, I., Tsiros, I., Chronopoulou-Sereli, A., & Matzarakis, A. (2013). Analysis of thermal bioclimate in various urban configurations in Athens, Greece. Urban Ecosystems, 16(2), 217-233.
- Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2015). Microclimate development in open urban spaces: The influence of form and materials. *Energy and Buildings, 108*, 156-174.
- Cheng, V., Ng, E., Chan, C., & Givoni, B. (2012). Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: a longitudinal study

based in Hong Kong. *International journal of biometeorology*, *56(1)*, 43-56.

- Cheung, P. K., & Jim, C. Y. (2018). Comparing the cooling effects of a tree and a concrete shelter using PET and UTCI. *Building and Environment*, *130*, 49-61.
- Chun, B., & Guldmann, J. M. (2014). Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities. *Landscape and urban planning*, *125*, 76-88.
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet, 389(10082)*, 1907-1918.
- Collins, W. (1978). Remote sensing of crop type and maturity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 44(1),* 43-55.
- Coutts, A. M., Tapper, N. J., Beringer, J., Loughnan, M., & Demuzere, M. (2013). Watering our cities: The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. *Progress in physical geography*, 37(1), 2-28.
- Dang, Q. L., Margolis, H. A., Sy, M., Coyea, M. R., Collatz, G. J., & Walthall, C. L. (1997). Profiles of photosynthetically active radiation, nitrogen and photosynthetic capacity in the boreal forest: Implications for scaling from leaf to canopy. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 102*(D24), 28845-28859.
- Dantzig, G. B., & Saaty, T. L. (1973). *Compact city: a plan for a liveable urban environment*. WH Freeman.
- Daoud, J. I. (2017). Multicollinearity and regression analysis. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 949, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.

de Lemos Martins, T. A., Adolphe, L., Bastos, L. E. G., & de Lemos Martins, M. A. (2016). Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context. *Solar Energy*, 137, 11-24.

Demographia, (2022), DEMOGRAPHIA WORLD URBAN AREAS

- Di, Y., Xu, M., Zhu, Z., Yang, H., & Chen, X. (2022). Analysis of ridesourcing drivers' working Pattern (s) via spatiotemporal work slices: A case study in Hangzhou. *Transport Policy*, 125, 336-351.
- Doick, K., & Hutchings, T. (2013). *Air temperature regulation by urban trees and green infrastructure* (No. 012). Forestry Commission.
- Došilović, F. K., Brčić, M., & Hlupić, N. (2018, May). Explainable artificial intelligence: A survey. In *2018 41st International convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO)* (pp. 0210-0215). IEEE.
- Dougherty, M. (1995). A review of neural networks applied to transport. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 3(4)*, 247-260.
- Easa, S., & Samdahl, D. (1998). Transportation, land use, and air quality: Making the connection.
- Edussuriya, P., Chan, A., & Malvin, A. (2014). Urban morphology and air quality in dense residential environments: Correlations between morphological parameters and air pollution at street-level. *Journal of engineering science and technology, 9(1),* 64-80.
- Edussuriya, P., Chan, A., & Ye, A. (2011). Urban morphology and air quality in dense residential environments in Hong Kong. Part I: District-level analysis. *Atmospheric Environment*, *45*(27), 4789-4803.
- Elden, S. (2013). Secure the volume: Vertical geopolitics and the depth of power. *Political geography*, *34*, 35-51.

- Emmanuel, R., Rosenlund, H., & Johansson, E. (2007). Urban shading a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 27(14)*, 1995-2004.
- Equere, V., Mirzaei, P. A., Riffat, S., & Wang, Y. (2021). Integration of topological aspect of city terrains to predict the spatial distribution of urban heat island using GIS and ANN. *Sustainable Cities and Society, 69*, 102825.
- Erell, E., Pearlmutter, D., & Williamson, T. (2012). *Urban microclimate: designing the spaces between buildings*. Routledge.
- Escobedo, F. J., & Nowak, D. J. (2009). Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape and urban planning, 90(3-4)*, 102-110.
- Ewing, R., & Cervero, R. (2001). Travel and the built environment: a synthesis. *Transportation research record, 1780(1)*, 87-114.
- Ewing, R., & Cervero, R. (2010). Travel and the built environment: A meta-analysis. *Journal of the American planning association*, 76(3), 265-294.
- Ewing, R., & Hamidi, S. (2015). Compactness versus sprawl: A review of recent evidence from the United States. *Journal of Planning Literature, 30(4)*, 413-432.
- Ewing, R., Schmid, T., Killingsworth, R., Zlot, A., & Raudenbush, S. (2003). Relationship between urban sprawl and physical activity, obesity, and morbidity. *American journal of health promotion*, *18*(1), 47-57.
- Fallmann, J. (2014). Numerical simulations to assess the effect of urban heat island mitigation strategies on regional air quality (Doctoral dissertation, Universität zu Köln).
- Frampton A, Solomon JD and Wong C (2012) Cities without Ground: A Hong Kong Guidebook. Singapore: Oro Editions.
- Frumkin, H. (2002). Urban sprawl and public health. *Public health* reports, 117(3), 201.

- Fu X, Liu J, Ban-Weiss G, et al. (2017) Effects of canyon geometry on the distribution of traffic-related air pollution in a large urban area: implications of a multi-canyon air pollution dispersion model. *Atmospheric Environment 165*: 111–121.
- Gabriel, K. M., & Endlicher, W. R. (2011). Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental pollution, 159(8-9)*, 2044-2050.
- Gál, T. M., & Sümeghy, Z. (2007). Mapping the roughness parameters in a large urban area for urban climate applications. *Acta Climatologica ET Chorologica*, *40*, 27-36.
- Gál, T., & Unger, J. (2009). Detection of ventilation paths using highresolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Building and Environment, 44(1)*, 198-206.
- Gao, Y., Wang, Z., Li, C. Y., Zheng, T., & Peng, Z. R. (2021). Assessing neighborhood variations in ozone and PM2. 5 concentrations using decision tree method. *Building and Environment, 188,* 107479.
- Geiger, R. 1942. *The climate near the ground*. Cambridge, MA: Havard Press
- Georgakis, C., Santamouris, M., (2008). On the estimation of wind speed in urban canyons for ventilation purposes—part 1: coupling between the undisturbed wind speed and the canyon wind. *Building and Environment, 43(8)*, 1404–1410
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built environment, 33(1)*, 115-133.
- Gim, T. H. T. (2012). A meta-analysis of the relationship between density and travel behavior. *Transportation*, *39(3)*, 491-519.
- Gim, T. H. T. (2013). The relationships between land use measures and travel behavior: A meta-analytic approach. *Transportation Planning and Technology, 36(5)*, 413-434.

- Gim, T. H. T. (2021). Partial least squares regression and importance– satisfaction analyses of the strategic drivers of happiness: A quality of life survey in Seoul, Korea. Growth and Change, 52(1), 567-599.
- Giridharan, R., & Emmanuel, R. (2018). The impact of urban compactness, comfort strategies and energy consumption on tropical urban heat island intensity: A review. *Sustainable cities and society, 40*, 677-687.
- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., & Ganesan, S. (2005). Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy and Buildings, 37(9)*, 964-971.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley & Sons.
- Golshani, N., Shabanpour, R., Mahmoudifard, S. M., Derrible, S., & Mohammadian, A. (2018). Modeling travel mode and timing decisions: Comparison of artificial neural networks and copula-based joint model. *Travel Behaviour and Society*, 10, 21-32.
- Gómez-Baggethun, E., Gren, Å., Barton, D. N., Langemeyer, J., McPhearson, T., O'farrell, P., ... & Kremer, P. (2013). Urban ecosystem services. In *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities* (pp. 175-251). Springer, Dordrecht.
- Grimmond, C. S. B. (1992). The suburban energy balance: Methodological considerations and results for a mid-latitude west coast city under winter and spring conditions. *International Journal of Climatology*, 12(5), 481-497.
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 38(9)*, 1262–1292.
- Grimmond, C. S. B., Roth, M., Oke, T. R., Au, Y. C., Best, M., Betts, R., ... & Voogt, J. (2010). Climate and more sustainable cities: climate

information for improved planning and management of cities (producers/capabilities perspective). *Procedia Environmental Sciences, 1*, 247-274.

- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment, 584*, 1040-1055.
- Gupta, A., & Lam, M. S. (1996). Estimating missing values using neural networks. *Journal of the Operational Research Society, 47(2)*, 229-238.
- Hamidi, S., Ewing, R., Preuss, I., & Dodds, A. (2015). Measuring sprawl and its impacts: An update. *Journal of Planning Education and Research*, *35*(1), 35-50.
- Hang, J., & Li, Y. (2011). Age of air and air exchange efficiency in highrise urban areas and its link to pollutant dilution. *Atmospheric Environment*, 45(31), 5572-5585.
- Hang, J., Sandberg, M., & Li, Y. (2009). Age of air and air exchange efficiency in idealized city models. *Building and Environment*, 44(8), 1714-1723.
- Harris, A. (2015). Vertical urbanisms: Opening up geographies of the three-dimensional city. *Progress in Human Geography*, *39*(5), 601-620.
- Hathway, E. A., & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment, 58*, 14-22.
- He, B. J., Ding, L., & Prasad, D. (2019). Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: A case study based on the Greater Sydney, Australia. *Sustainable Cities and Society, 47*, 101472.
- He, C., Shi, P., Xie, D., & Zhao, Y. (2010). Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach. *Remote Sensing Letters, 1(4)*, 213-221.

- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The urban heat island: implications for health in a changing environment. *Current environmental health reports, 4(3)*, 296-305.
- Heiden, U., Heldens, W., Roessner, S., Segl, K., Esch, T., & Mueller, A.
  (2012). Urban structure type characterization using hyperspectral remote sensing and height information. *Landscape and urban Planning*, *105*(4), 361-375.
- Henderson, C. R. (1975). Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model. *Biometrics*, 423-447.
- Hermosilla, T., Palomar-Vázquez, J., Balaguer-Beser, Á., Balsa-Barreiro, J., & Ruiz, L. A. (2014). Using street based metrics to characterize urban typologies. *Computers, Environment and Urban Systems, 44*, 68-79.
- Herold, M., Hemphill, J., Dietzel, C., & Clarke, K. C. (2005, March). Remote sensing derived mapping to support urban growth theory. In 3rd international symposium remote sensing and data fusion over urban areas (URBAN 2005) and 5th international symposium remote sensing of urban areas (URS 2005).
- Hillier, B., & Hanson, J. (1989). *The social logic of space*. Cambridge university press.
- Ho, H. C., Knudby, A., Sirovyak, P., Xu, Y., Hodul, M., & Henderson, S.
  B. (2014). Mapping maximum urban air temperature on hot summer days. *Remote Sensing of Environment*, *154*, 38-45.
- Horrison, E., & Amirtham, L. R. (2016). Role of built environment on factors affecting outdoor thermal comfort-A case of T. Nagar, Chennai, India. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(5), 1-4.
- Howard, L. (1833). The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it (Vol. 3). Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter.

- Huang, J., Lu, X. X., & Sellers, J. M. (2007). A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and urban planning*, *82(4)*, 184-197.
- Huang, X., & Wang, Y. (2019). Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data:A case study of Wuhan, Central China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *152*, 119-131.
- Iglewicz, B. & Hoaglin, D. C., (1993), How to detect and handle outliers, ASQC Basic References in *Quality Control, vol.16* (Milwaukee: ASQC Quality Press)
- Jaganmohan, M., Knapp, S., Buchmann, C. M., & Schwarz, N. (2016). The bigger, the better? The influence of urban green space design on cooling effects for residential areas. *Journal of environmental quality*, 45(1), 134-145.
- Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern* recognition letters, 31(8), 651-666.
- Jamei, E., Jamei, Y., Rajagopalan, P., Ossen, D. R., & Roushenas, S. (2015). Effect of built-up ratio on the variation of air temperature in a heritage city. *Sustainable Cities and Society*, 14, 280-292.
- Jang, G., Kim, S., & Lee, J. S. (2022). Planning scenarios and microclimatic effects: The case of high-density riverside residential districts in Seoul, South Korea. *Building and Environment, 223*, 109517.
- Jochem, W. C., Leasure, D. R., Pannell, O., Chamberlain, H. R., Jones, P., & Tatem, A. J. (2021). Classifying settlement types from multi-scale spatial patterns of building footprints. *Environment* and Planning B: Urban Analytics and City Science, 48(5), 1161– 1179.
- Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and environment*, *41*(10), 1326-1338.

- Johansson, E., Spangenberg, J., Gouvêa, M. L., & Freitas, E. D. (2013). Scale-integrated atmospheric simulations to assess thermal comfort in different urban tissues in the warm humid summer of São Paulo, Brazil. Urban Climate, 6, 24-43.
- Johnson, M. P. (2001). Environmental impacts of urban sprawl: a survey of the literature and proposed research agenda. *Environment and planning A, 33(4)*, 717-735.
- Jusuf, S. K., Wong, N. H., Hagen, E., Anggoro, R., & Hong, Y. (2007). The influence of land use on the urban heat island in Singapore. *Habitat international*, 31(2), 232-242.
- Kalnay, E., & Cai, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature, 423(6939)*, 528-531.
- Kanda, M., Inagaki, A., Miyamoto, T., Gryschka, M., & Raasch, S. (2013).
  A new aerodynamic parametrization for real urban surfaces. *Boundary-layer meteorology*, *148(2)*, 357-377.
- Kappos, A. D., Bruckmann, P., Eikmann, T., Englert, N., Heinrich, U., Höppe, P., ... & Wichmann, H. E. (2004). Health effects of particles in ambient air. *International journal of hygiene and environmental health*, 207(4), 399-407.
- Ke, X., Men, H., Zhou, T., Li, Z., & Zhu, F. (2021). Variance of the impact of urban green space on the urban heat island effect among different urban functional zones: A case study in Wuhan. Urban Forestry & Urban Greening, 62, 127159.
- Kim, H., Jung, Y., & Oh, J. I. (2019). Transformation of urban heat island in the three-center city of Seoul, South Korea: The role of master plans. *Land Use Policy*, *86*, 328-338.
- Kim, M. H., & Gim, T. H. T. (2022). Deep learning-based investigation of the impact of urban form on the particulate matter concentration on a neighborhood scale. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 23998083221111162.

- Kong, L., Lau, K. K. L., Yuan, C., Chen, Y., Xu, Y., Ren, C., & Ng, E. (2017). Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*, *31*, 12–25.
- Kostof, S. (1991). *The city shaped* (pp. 9-39). Little, Brown and Company.
- Krayenhoff, E. S., Christen, A., Martilli, A., & Oke, T. R. (2014). A multilayer radiation model for urban neighbourhoods with trees. *Boundary-layer meteorology*, *151(1)*, 139-178.
- Kubota, T., Miura, M., Tominaga, Y., & Mochida, A. (2008). Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods. *Building and environment*, 43(10), 1699-1708.
- Lai, D., Liu, W., Gan, T., Liu, K., & Chen, Q. (2019). A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment, 661*, 337-353.
- Lai, L. W., & Cheng, W. L. (2009). Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns. *Science of the total environment, 407(8)*, 2724-2733.
- Lau, K.K.L., Ren, C., Ho, J., Ng, E., (2016). Numerical modelling of mean radiant temperature in high-density sub-tropical urban environment. *Energy and buildings*, 114, 80–86.
- Lee, C. (2019a). Impacts of urban form on air quality in metropolitan areas in the United States. *Computers, Environment and Urban Systems*, 77, 101362.
- Lee, C. (2019b). Impacts of urban form on air quality: Emissions on the road and concentrations in the US metropolitan areas. *Journal of environmental management, 246*, 192–202.
- Lee, H., Mayer, H., & Chen, L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a

residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*, *148*, 37-50.

- Li, H., Meier, F., Lee, X., Chakraborty, T., Liu, J., Schaap, M., & Sodoudi, S. (2018). Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *Science of the total environment, 636*, 818-828.
- Li, Y., Schubert, S., Kropp, J. P., & Rybski, D. (2020). On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity. *Nature communications, 11(1)*, 1-9.
- Li, Y., Zhang, J., Ma, Z., & Zhang, Y. (2018). Clustering analysis in the wireless propagation channel with a variational Gaussian mixture model. *IEEE Transactions on Big Data, 6(2)*, 223-232.
- Lin, P., Lau, S. S. Y., Qin, H., & Gou, Z. (2017). Effects of urban planning indicators on urban heat island: a case study of pocket parks in high-rise high-density environment. *Landscape and Urban Planning*, *168*, 48-60.
- Lin, Z. (2018). Vertical urbanism: Re-conceptualizing the compact city. In *Vertical Urbanism* (pp. 3-18). Routledge.
- Loughner, C. P., Allen, D. J., Zhang, D. L., Pickering, K. E., Dickerson, R. R., & Landry, L. (2012). Roles of urban tree canopy and buildings in urban heat island effects: Parameterization and preliminary results. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *51(10)*, 1775-1793.
- Lowry, W. P. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *16(2)*, 129-135.
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems, 30.*
- Lundberg, S. M., Erion, G. G., & Lee, S. I. (2018). Consistent individualized feature attribution for tree ensembles. *arXiv* preprint arXiv:1802.03888.

- Lundberg, S. M., Erion, G., Chen, H., DeGrave, A., Prutkin, J. M., Nair, B., ... & Lee, S. I. (2020). From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. *Nature machine intelligence*, 2(1), 56-67.
- Lundberg, S. M., Nair, B., Vavilala, M. S., Horibe, M., Eisses, M. J., Adams, T., ... & Lee, S. I. (2018). Explainable machine-learning predictions for the prevention of hypoxaemia during surgery. *Nature biomedical engineering*, 2(10), 749-760.
- Lynch, K. (1984). Good city form. MIT press.
- Ma, M., Hu, D., Steven, I., Chien, J., Liu, J., Yang, X., & Ma, Z. (2022). Evolution assessment of urban rail transit networks: A case study of Xi'an, China. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 603*, 127670.
- Maas, A. L., Hannun, A. Y., & Ng, A. Y. (2013, June). Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models. In *Proc. icml* (Vol. 30, No. 1, p. 3).
- Macdonald, R. W., Griffiths, R. F., & Hall, D. J. (1998). An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric environment*, *32*(11), 1857-1864.
- Manteghi, G., bin Limit, H., & Remaz, D. (2015). Water bodies an urban microclimate: A review. *Modern Applied Science, 9(6)*, 1.
- Marciotto, E. R., Oliveira, A. P., & Hanna, S. R. (2010). Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme. *Building and Environment, 45(11),* 2497-2505.
- Martinelli, L., & Matzarakis, A. (2017). Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones. *Sustainable Cities and Society*, *29*, 97-106.
- Mathew, A., Khandelwal, S., & Kaul, N. (2016). Spatial and temporal variations of urban heat island effect and the effect of percentage impervious surface area and elevation on land

surface temperature: Study of Chandigarh city, India. *Sustainable Cities and Society, 26*, 264-277.

- McClendon, M. J. (2002). *Multiple regression and causal analysis*. Waveland Press.
- McKenzie, J. (2011). Mean absolute percentage error and bias in economic forecasting. *Economics Letters*, *113*(3), 259-262.
- McNeill, D. (2005). Skyscraper geography. *Progress in human geography*, *29*(1), 41-55.
- McNeill, D. (2019). Volumetric urbanism: The production and extraction of Singaporean territory. *Environment and Planning A: Economy and Space*, *51*(4), 849-868.
- McNeill, D. (2020). The volumetric city. *Progress in Human Geography*, 44(5), 815-831.
- Memon, Leung and Liu, (2008), A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island, *Journal of Environmental Sciences, 20(1)*, pp.120-128.
- Merlier, L., Kuznik, F., Rusaouën, G., & Salat, S. (2018). Derivation of generic typologies for microscale urban airflow studies. *Sustainable Cities and Society, 36*, 71–80.
- Mills, G. (2008). Luke Howard and the climate of London. *Weather, 63(6)*, 153-157.
- Mirkovic, M., & Alawadi, K. (2017). The effect of urban density on energy consumption and solar gains: The study of Abu Dhabi's neighborhood. *Energy Procedia*, *143*, 277-282.
- Mirzaei, P. A., & Haghighat, F. (2010). Approaches to study urban heat island-abilities and limitations. *Building and environment*, 45(10), 2192-2201.
- Mirzaei, P.A., Haghighat, F., (2010). Approaches to study urban heat island-abilities and limitations. *Building and Environment, 45 (10)*, 2192–2201.

Mislan, K. A. S., & Helmuth, B. (2008). Microclimate.

- Moon, Y., & Yao, T. (2011). A robust mean absolute deviation model for portfolio optimization. *Computers & Operations Research*, *38*(9), 1251-1258.
- Morakinyo, T. E., Dahanayake, K. K. C., Adegun, O. B., & Balogun, A.
  A. (2016). Modelling the effect of tree-shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university. *Energy and Buildings*, *130*, 721-732.
- Morikawa, M. (2011). Economies of density and productivity in service industries: An analysis of personal service industries based on establishment-level data. *The Review of Economics and Statistics*, *93*(1), 179-192.
- Mou, B., He, B. J., Zhao, D. X., & Chau, K. W. (2017). Numerical simulation of the effects of building dimensional variation on wind pressure distribution. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 11(1), 293–309.
- Næss, P. (2005). Residential location affects travel behavior—but how and why? The case of Copenhagen metropolitan area. *Progress in Planning*, *2*(63), 167-257.
- Nair, V., Hinton, G., (2010). Rectified linear units improve restricted boltzmann machines. *Proceedings of the 27th international conference on machine learning (ICML-10)* (pp. 807-814).
- Ng, E. (2009). Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities–air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. *Building and environment, 44(7)*, 1478–1488.
- Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C., & Fung, J. C. (2011). Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban planning, 101(1),* 59-74.
- Ngarambe, J., Joen, S. J., Han, C. H., & Yun, G. Y. (2021). Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO2, NO2, O3 and

urban heat island in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, *403*, 123615.

- O'Neill, M. S., Carter, R., Kish, J. K., Gronlund, C. J., White-Newsome, J. L., Manarolla, X., ... & Schwartz, J. D. (2009). Preventing heatrelated morbidity and mortality: new approaches in a changing climate. *Maturitas, 64(2)*, 98-103.
- Oaxaca, R. L., & Geisler, I. (2003). Fixed effects models with time invariant variables: a theoretical note. *Economics Letters, 80(3)*, 373-377.
- Obite, C. P., Olewuezi, N. P., Ugwuanyim, G. U., & Bartholomew, D. C. (2020). Multicollinearity effect in regression analysis: A feed forward artificial neural network approach. *Asian journal of probability and statistics, 6(1),* 22–33.
- Offerle, B., Eliasson, I., Grimmond, C. S. B., & Holmer, B. (2007). Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, *122*(2), 273-292.
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)*, 7(8), 769-779.
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. Energy and buildings, 11(1-3), 103-113.
- Oke, T. R. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In *Wind climate in cities* (pp. 81-107). Springer, Dordrecht.
- Oke, T. R. (2002). *Boundary layer climates*. Routledge.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2015). *The metropolitan century: Understanding urbanisation and its consequences*. OECD Publishing.

- Park (2021). Comparison of Temperatures and Spatial Resolutions between Urban Sensors and National Weather Observations (ASOS, AWS) for Urban Heat Island Intensity Analysis. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 21(3), 39-48.
- Pendall, R. (1999). Do land-use controls cause sprawl?. *Environment* and Planning B: Planning and Design, 26(4), 555-571.
- Penn, A., Hillier, B., Banister, D., & Xu, J. (1998). Configurational modelling of urban movement networks. *Environment and Planning B: planning and design, 25(1)*, 59-84.
- Ping, J. L., Green, C. J., Bronson, K. F., Zartman, R. E., & Dobermann, A. (2004). Identification of relationships between cotton yield, quality, and soil properties. *Agronomy journal*, 96(6), 1588– 1597.
- Pugh, T. A., MacKenzie, A. R., Whyatt, J. D., & Hewitt, C. N. (2012). Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental science & technology*, 46(14), 7692-7699.
- Qin, J., Fang, C., Wang, Y., Li, G., & Wang, S. (2015). Evaluation of three-dimensional urban expansion: A case study of Yangzhou City, Jiangsu Province, China. *Chinese geographical science*, 25(2), 224-236.
- Qin, Y., & Hiller, J. E. (2014). Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy and Buildings, 85*, 389-399.
- Qiu, G. Y., LI, H. Y., Zhang, Q. T., Wan, C. H. E. N., Liang, X. J., & Li, X. Z. (2013). Effects of evapotranspiration on mitigation of urban temperature by vegetation and urban agriculture. *Journal* of Integrative Agriculture, 12(8), 1307-1315.
- Rajagopalan, P., Lim, K. C., & Jamei, E. (2014). Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city. *Solar Energy*, *107*, 159-170.

- Ramírez-Aguilar, E. A., & Souza, L. C. (2019). Urban form and population density: Influences on Urban Heat Island intensities in Bogotá, Colombia. *Urban Climate, 29*, 100497.
- Ren, C., Yang, R., Cheng, C., Xing, P., Fang, X., Zhang, S., ... & Ng, E. (2018). Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan-the implementation in Chinese cities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 182*, 170-188.
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., & Chunho, L. I. U. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of environmental sciences, 20(1)*, 120-128.
- Rotach, M. W., & Calanca, P. (2002). Microclimate. In *Encyclopaedia of Atmospheric Sciences* (pp. 1301-1307). Elsevier.
- Ryu, Y. H., & Baik, J. J. (2012). Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island intensity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 842-854.
- Samek, W., Montavon, G., Lapuschkin, S., Anders, C. J., & Müller, K. R. (2021). Explaining deep neural networks and beyond: A review of methods and applications. *Proceedings of the IEEE*, 109(3), 247-278.
- Santamouris, M. (2001), *Energy and climate in the urban built environment*, James& James, London, UK.
- Santamouris, M. (2013). *Energy and climate in the urban built environment*. Routledge.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities-a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar energy*, *103*, 682-703.
- Santamouris, M., Georgakis, C., Niachou, A., (2008). On the estimation of wind speed in urban canyons for ventilation purposes—part2: using of data driven techniques to calculate the more

probable wind speed in urban canyons for low ambient wind speeds. *Building and Environment.* 43 (8), 1411–1418.

- Schrijvers, P. J. C., Jonker, H. J. J., de Roode, S. R., & Kenjereš, S. (2020).On the daytime micro-climatic conditions inside an idealized 2D urban canyon. *Building and Environment*, *167*, 106427.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics*, 461-464.
- Shareef, S. (2021). The impact of urban morphology and building's height diversity on energy consumption at urban scale. The case study of Dubai. *Building and Environment*, *194*, 107675.
- Sharma, A., Conry, P., Fernando, H. J. S., Hamlet, A. F., Hellmann, J. J., & Chen, F. (2016). Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: Evaluation with a regional climate model. *Environmental Research Letters, 11(6)*, 064004.
- Sharmin, T., Steemers, K., & Matzarakis, A. (2015). Analysis of microclimatic diversity and outdoor thermal comfort perceptions in the tropical megacity Dhaka, Bangladesh. *Building and Environment, 94*, 734-750.
- Sharmin, T., Steemers, K., & Matzarakis, A. (2017). Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 34, 293– 308.
- Shi Y, Ho H, Xu Y, et al. (2018). Improving satellite aerosol optical Depth-PM correlations using land use regression with microscale geographic predictors in a high-density urban context. *Atmospheric Environment, 190,* 23–34.
- Shih, W. M., Lin, T. P., Tan, N. X., & Liu, M. H. (2017). Long-term perceptions of outdoor thermal environments in an elementary school in a hot-humid climate. *International journal of biometeorology*, 61(9), 1657-1666.

- Shirowzhan, S., Sepasgozar, S. M., Li, H., & Trinder, J. (2018). Spatial compactness metrics and Constrained Voxel Automata development for analyzing 3D densification and applying to point clouds: A synthetic review. *Automation in Construction, 96*, 236-249.
- Silva, I., Santos, R., Lopes, A., & Araújo, V. (2018). Morphological indices as urban planning tools in northeastern Brazil. *Sustainability*, *10(12)*, 4358.
- Son, J., Jeong, S., Park, H., & Park, C. E. (2020). The effect of particulate matter on solar photovoltaic power generation over the Republic of Korea. *Environmental Research Letters*, 15(8), 084004.
- Song, J., Wang, Z. H., & Wang, C. (2018). The regional impact of urban heat mitigation strategies on planetary boundary layer dynamics over a semiarid city. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123(12)*, 6410-6422.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Stone, B., Hess, J.J., Frum, H., (2010). Urban form and extreme heat events: are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities. *Environmental health perspective, 118(10),* 1425–1428.
- Sundborg, A. (1951). *Climatological studies in Uppsala with special regard to the temperature conditions in the urban area.* Geographica, 22. Geographical Institute of Uppsala.
- Taha, H. (2004), Heat Islands and Energy, Encyclopedia of Energy, 3.
- Taha, H. (2008). Meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation. *Atmospheric Environment, 42(38)*, 8795-8809.

- Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A., & Huang, J. (1988). Residential cooling loads and the urban heat island—the effects of albedo. *Building and environment, 23(4)*, 271-283.
- Taleghani, M., & Berardi, U. (2018). The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban climate, 24*, 449-459.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., van den Dobbelsteen, A., & Sailor, D. J. (2014). Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Solar Energy*, *103*, 108-124.
- Tan, C. L., Wong, N. H., & Jusuf, S. K. (2013). Outdoor mean radiant temperature estimation in the tropical urban environment. *Building and Environment*, 64, 118-129.
- Theeuwes, N. E., Solcerova, A., & Steeneveld, G. J. (2013). Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(16)*, 8881-8896.
- Theeuwes, N. E., Steeneveld, G. J., Ronda, R. J., Heusinkveld, B. G., Van Hove, L. W. A., & Holtslag, A. A. M. (2014). Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140(684)*, 2197-2210.
- Tian, Y., Zhou, W., Qian, Y., Zheng, Z., & Yan, J. (2019). The effect of urban 2D and 3D morphology on air temperature in residential neighborhoods. *Landscape Ecology*, 34(5), 1161-1178.
- Toja-Silva, F., Peralta, C., Lopez-Garcia, O., Navarro, J., & Cruz, I. (2015). On roof geometry for urban wind energy exploitation in high-rise buildings. *Computation*, 3(2), 299-325.
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & Van Heijst, G. J. F. (2017). A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80*, 1613-1640.

- Tsang, C. W., Kwok, K. C., & Hitchcock, P. A. (2012). Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings: Effects of building dimensions, separation and podium. *Building and Environment*, 49, 167-181.
- Turner, A., Doxa, M., O'sullivan, D., & Penn, A. (2001). From isovists to visibility graphs: a methodology for the analysis of architectural space. *Environment and Planning B: Planning and design, 28(1)*, 103-121.
- Veaux, R. D. D., & Ungar, L. H. (1994). Multicollinearity: A tale of two nonparametric regressions. In *Selecting models from data: artificial intelligence and statistics IV*(pp. 393-402). Springer, New York, NY.
- Wang, Y., & Akbari, H. (2014). Effect of sky view factor on outdoor temperature and comfort in Montreal. *Environmental Engineering Science*, 31(6), 272-287.
- Wang, Y., & Akbari, H. (2016). The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. Sustainable Cities and Society, 27, 122-128.
- Wang, Y., Bakker, F., De Groot, R., Wörtche, H., & Leemans, R. (2015). Effects of urban green infrastructure (UGI) on local outdoor microclimate during the growing season. Environmental monitoring and assessment, 187(12), 1-14.
- Wang, Y., Berardi, U., & Akbari, H. (2016). Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and buildings, 114*, 2-19.
- Wiernga, J. (1993). Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 63(4), 323-363.
- Wit, E., Heuvel, E. V. D., & Romeijn, J. W. (2012). 'All models are wrong...': an introduction to model uncertainty. *Statistica Neerlandica, 66(3)*, 217-236.

- Wong, P. P. Y., Lai, P. C., Low, C. T., Chen, S., & Hart, M. (2016). The impact of environmental and human factors on urban heat and microclimate variability. *Building and Environment*, 95, 199-208.
- World Bank staff estimates based on the United Nations Population Division's World Urbanization Prospects: 2018 Revision.
- Xing, Y. F., Xu, Y. H., Shi, M. H., & Lian, Y. X. (2016). The impact of PM2. 5 on the human respiratory system. *Journal of thoracic disease*, 8(1), E69.
- Xu, Y., Ren, C., Ma, P., Ho, J., Wang, W., Lau, K. K. L., ... & Ng, E. (2017). Urban morphology detection and computation for urban climate research. *Landscape and urban planning*, 167, 212-224.
- Yan, H., Fan, S., Guo, C., Wu, F., Zhang, N., & Dong, L. (2014). Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability: The case of Beijing, China. *Building* and environment, 76, 44-53.
- Yang, C., & Zhao, S. (2022). A building height dataset across China in 2017 estimated by the spatially-informed approach. *Scientific Data*, 9(1), 1-11.
- Yang, F., & Chen, L. (2020). *High-Rise Urban Form and Microclimate*. Springer Singapore.
- Yang, J., Shi, B., Shi, Y., Marvin, S., Zheng, Y., & Xia, G. (2020). Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101941.
- Yang, J., Wang, Z. H., Kaloush, K. E., & Dylla, H. (2016). Effect of pavement thermal properties on mitigating urban heat islands: A multi-scale modeling case study in Phoenix. *Building and Environment, 108*, 110-121.
- Yang, Y., Gatto, E., Gao, Z., Buccolieri, R., Morakinyo, T. E., & Lan, H. (2019). The "plant evaluation model" for the assessment of the

impact of vegetation on outdoor microclimate in the urban environment. *Building and environment, 159*, 106151.

- Yao, R., Luo, Q., Luo, Z., Jiang, L., & Yang, Y. (2015). An integrated study of urban microclimates in Chongqing, China: Historical weather data, transverse measurement and numerical simulation. Sustainable Cities and Society, 14, 187-199.
- Yim, S. H., Fung, J. C. H., Lau, A. K.-H., & Kot, S. C. (2009). Air ventilation impacts of the "wall effect" resulting from the alignment of high-rise buildings. *Atmospheric Environment*, 43(32), 4982–4994.
- Yoshida, H., & Omae, M. (2005). An approach for analysis of urban morphology: methods to derive morphological properties of city blocks by using an urban landscape model and their interpretations. *Computers, Environment and Urban Systems, 29*(2), 223-247.
- Yuan, C., & Ng, E. (2012). Building porosity for better urban ventilation in high-density cities–A computational parametric study. *Building and Environment, 50*, 176-189.
- Yuan, M., Song, Y., Hong, S., & Huang, Y. (2017). Evaluating the effects of compact growth on air quality in already-high-density cities with an integrated land use-transport-emission model: A case study of Xiamen, China. *Habitat International, 69*, 37-47.
- Yuan, M., Song, Y., Huang, Y., Shen, H., & Li, T. (2019). Exploring the association between the built environment and remotely sensed PM2. 5 concentrations in urban areas. *Journal of cleaner* production, 220, 1014-1023.
- Zardo, L., Geneletti, D., Pérez-Soba, M., & Van Eupen, M. (2017). Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. *Ecosystem services*, *26*, 225-235.
- Zhang, G., He, B. J., Zhu, Z., & Dewancker, B. J. (2019). Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates. *International journal of environmental research and public health, 16(2)*, 179.

- Zhang, J., Cui, P., & Song, H. (2020). Impact of urban morphology on outdoor air temperature and microclimate optimization strategy base on Pareto optimality in Northeast China. *Building* and Environment, 180, 107035.
- Zhang, K., Wang, R., Shen, C., & Da, L. (2010). Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai, China. *Environmental monitoring and assessment*, *169*(1), 101-112.
- Zhao, L., Lee, X., Smith, R. B., & Oleson, K. (2014). Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, *511*(7508), 216-219.
- Zheng, S., Zhao, L., & Li, Q. (2016). Numerical simulation of the impact of different vegetation species on the outdoor thermal environment. Urban forestry & urban greening, 18, 138-150.
- Zhou, B., Rybski, D., & Kropp, J. P. (2017). The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific reports*, 7(1), 1-9.
- Zhou, X., & Chen, H. (2018). Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon. Science of the Total Environment, 635, 1467-1476.
- 김영욱. (2003). Space Syntax 를 활용한 공간구조속성과 공간사용패턴의 상호관련성 연구: 인사동 지역의 보행자 및 차량 통행량을 중심으로. 국토계획, 38(4), 7-17.

민인식. (2012). 고급 패널데이터 분석 STATA. [KIIP] 한국지식재산연구원.

- 박근송. (2018). 도시 공간분석을 위한 사회·물리적 공간 네트워크 모형 개발-공간구문론과 위치 기반 소셜 네트워크 빅 데이터를 중심으로(Doctoral dissertation, 서울대학교 대학원).
- 박해경. (2021). 도시 열섬 강도 분석을 위한 도시데이터 센서와 국가기상관측 간기온 및 공간해상도 비교 연구. J. Korean Soc. Hazard Mitig, 21(3), 39-48.

박현찬과 정상혁. (2017). 누구를 위한 높이인가. 서울연구원
서울특별시, (2001). 서울 20세기 공간변천사. 서울시정개발연구원.

서울특별시, (2014). 2030 서울플랜.

- 서울특별시, (2021). 기후변화 대응을 위한 도시계획 수립 기법에 관한 연구. 서울연구원.
- 이범동, 이종세, & 김주연. (2020). 공간구문론을 통한 공간분석 경향에 대한 연구. *한국공간디자인학회 논문집, 15(3)*, 103-116.

## Abstract

## The effect of vertical urban form on the urban climate – From vertical to volume–

Kim, Moon-Hyun Department of Environmental Planning Graduate School of Environmental Studies Seoul National University

Urban form is a major factor in explaining the interaction between human activities and the environment. Historically, research on urban form principally focused on horizontal forms, and its primary goal was the improvement of urban spaces' efficiency and functionality. However, the two-dimensional properties of urban form, such as landuse change, are not sufficient to explain changes in urban climate. In recent years, there has been growing interest in the geometrical structure created by vertical urban form and its impact on urban climate, particularly urban temperature. While some indicators of vertical urban form have been shown to impact temperature, there remain gaps in our understanding, including a lack of consistent measurement standards and an incomplete understanding of the complex interactions within space.

This study aimed to systematically analyze the impact of vertical urban form on air temperature. First, this study proposed vertical urban form indices to investigate the effect on air temperature. Despite recognition of the impact of vertical urban form on air temperature, previous studies have not systematically analyzed the measurement criteria of vertical urban form and its impact on air temperature. To address these deficits, four measurable indices were proposed: Vertical, Variance, Volume, and Vacant. These indices have been identified as key factors that regulate the effect of urban form on air temperature, including factors based on previous research including shade, heat capacity, and ventilation performance.

The proposed indices, including 1-dimensional (height), 2dimensional (planar), and 3-dimensional (volumetric) indices, were analyzed to examine the effects of individual and interacting indices on air temperature. The indices are interdependent, and therefore, deep learning models were used to account for the interaction between them. A prediction model was constructed using a 2-layer artificial neural network, and the impacts of the individual and interactive indices were derived using the Shapley additive explanation (SHAP) method, which is an analytical method that explains the output of machine- and deep-learning models.

The influence of individual and interactive vertical urban forms on a local scale varies based on the specific characteristics of these forms. The complicated airflow caused by the conflicting effects of shadows and ventilation performance and the interrelationships between urban forms can make it difficult to make generalizations. This study aimed to analyze the differences in the impact of urban form characteristics on a local scale. It is important to consider that temperature mitigation strategies should be tailored to specific urban form characteristics, as different critical indices were identified in areas with dense low-rise or high-rise buildings.

The results of the study showed that four indices of vertical urban form have a significant impact on urban air temperature. During the summer, the degree of openness (Vacant) and the average spatial height (Vertical) are critical factors in regulating air temperature. The shading effect of high-rise buildings and the ventilation performance provided by the openness improve thermal comfort. A significant finding was the interaction between spatial vacancy and height, as shown by the SHAP dependence plot. Sensitivity levels varied depending on whether the openness was above or below average. In areas with low openness, spatial height was more sensitive, and the temperature rapidly increased with low building height. In densely packed, low-height areas, cooling effects from shading or ventilation cannot be expected.

This study revealed that maintaining low spatial density beneath the urban canopy layer is a practical way to decrease the urban temperature on a local level. The spatial density was composed of spatial vacancy and height. Previous studies substituted building volume (Volume) with spatial density, emphasizing the negative impact of building volume on urban temperature. The results of this study showed that better ventilation from high spatial vacancy and improved shading from height could effectively mitigate the urban temperature by offsetting the impact of building volume on temperature rise. For instance, although the total building volume is high, a dense area of high-rise buildings has better thermal comfort than a dense area of low-rise buildings. This is because high-rise buildings create shading and have larger spatial vacancies, which enhance ventilation and reduce temperature. It is essential to understand spatial density in terms of the interplay between spatial vacancy and height. New insights were added by the relationship between spatial vacancy and building volume and the relationship between spatial height and height variation (Variation). When a spatial vacancy is low and building volume is high, the air temperature becomes more sensitive to the volume, causing rapid temperature increases in certain areas. Additionally, areas with low and constant heights experience a rapid rise in temperature.

In addition, this study confirmed that the impact of urban form on temperature varies depending on urban characteristics on a local scale. Using the gaussian mixture model, urban form characteristics were classified into five clusters, which can be summarized as follows. Cluster 1 is a dense low-rise building area with constant height. Cluster 2 is a dense low- and mid-rise building area next to a stream. Cluster 3 is an area with a concentration of mid- and high-rise buildings of varying heights. Cluster 4 is an area with mid- and high-rise buildings with ample spatial vacancy. Cluster 5 is an area close to green spaces and rivers. The significant indices of the vertical urban form varied based on the cluster type. This result implies that the strategy for reducing regional temperature should be tailored to the specific urban form characteristics.

The contribution of this dissertation research can be divided into both theoretical and practical aspects. Theoretically, this research comprehensively explains the relationship between vertical urban form and urban temperature. The complex interactions between urban forms have resulted in difficulties when generalizing the results of previous studies; however, this study offers insight into the significance of vertical urban form indices and the impact of their interactions. Practically, this research suggests pragmatic policy interventions for urban planners and designers aiming to mitigate urban temperatures. Because the physical environment of cities cannot be easily altered from the top down, a careful approach is necessary. Furthermore, resources are limited, making it crucial to prioritize the methods used. In sum, the results of this study can help improve cities' thermal environments.

Keywords : Vertical urban form, Air temperature, Urban geometric, Interactive effect of urban form, Urban temperature mitigation Student Number : 2019-33816