creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조경학석사 학위논문

도시 고밀화 유형에 따른 폭염기간 냉방 취약성 차이

- 수도권 공동주택 대상 실증분석 -

Urban Densification Type Affects Cooling Energy Vulnerability in Heatwaves

– An Empirical Study in Seoul Metropolitan Area –

2023년 2월

서울대학교 환경대학원

환경조경학과 도시환경설계전공 및

대학원 융합전공 스마트시티 글로벌 융합

최 준 혁

도시 고밀화 유형에 따른
폭염기간 냉방 취약성 차이

- 수도권 공동주택 대상 실증분석 -

지도교수 이 제 승

이 논문을 조경학석사 학위논문으로 제출함
2022년 10월

서울대학교 대학원
환경조경학과 도시환경설계전공 및
대학원 융합전공 스마트시티 글로벌 융합
최 준 혁

최준혁의 석사 학위논문을 인준함
2022년 12월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

도시 고밀화 유형에 따른
폭염기간 냉방 취약성 차이

- 수도권 공동주택 대상 실증분석 -

서울대학교 대학원
환경조경학과 도시환경설계전공 및
대학원 융합전공 스마트시티 글로벌 융합
최 준 혁

위 논문은 서울대학교 및 환경대학원 환경조경학과 학위논문
관련 규정에 의거하여 심사위원의 지도과정을 충실히
이수하였음을 확인합니다.

2023년 2월

위 원 장 김세훈 (서울대학교 환경대학원 교수)

부위원장 孫鎭勲 (서울대학교 환경대학원 교수)

위 원 이제승 (서울대학교 환경대학원 교수)

국 문 초 록

기후변화로 인해 극단적인 이상 기후가 빈번해지고 있으며 도시의 안정성을 위협하고 있다. 이 중 폭염은 도시 거주민의 열사병을 유발하여 사망률을 높이고 냉방 에너지 수요를 급증시킨다. 정상적인 도시 기능을 유지하기 위해서는 폭염 시 열 환경을 개선하고 냉방 수요 급증을 막을 필요가 있다.

본 연구에서는 어떠한 도시 형태가 폭염 기간 더욱 취약한가에 대해 탐구하였으며, 이를 밀도 관점에서 해석하였다. 왜냐하면 고밀화된 도시는 더욱 강한 열섬효과를 겪으며, 이는 냉방 에너지 소비를 증가시키기 때문이다. 특히 고밀도시는 경제성 및 지속 가능성 측면에서 많은 장점이 있는 것으로 논의되었지만, 과연 냉방 에너지 측면에서는 효율적인지에 대해서 추가적인 논의가 필요하다.

이러한 논의를 진행하고자 문헌 조사를 통해 도시 밀도를 정의하였으며 건물 냉방 에너지 간 관계를 파악하였다. 이 외에도 건물 냉방 에너지에 미치는 영향 요인들을 도시 환경을 포함하여 폭넓게 파악하였다. 이러한 과정들을 통해 구조적 밀도인 용적률로 도시 밀도를 정의하고 수직 밀도(층수)와 수평 밀도(건폐율)로 분해하였다. 밀도와 냉방 에너지 간 관계는 열섬효과, 그늘효과 및 표면비에 따른 열 유입의 상호작용에 따라 결정되며 열섬효과는 냉방 수요를 증가시킨다는 결과는 다수 존재한다. 그러나 층수를 높이는 고층 고밀화와 건폐율을 높이는 저층 고밀화 중 어떠한 형태가 이를 완화할 수 있는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

방법론적으로 고밀화된 도시가 폭염 기간 냉방 증가율이 더 높은지 실증적으로 확인하고자 하였다. 수도권의 공동주택 단지를 1,949개 선별하였으며, 데이터를 기반으로 평년 대비 폭염 기간의 냉방 에너지 증가율과 용적률, 평균 층수를 계산하였다. 기타 통제변수는 냉방 에너지 영향 요인을 기반으로 정의하여 정량적으로 계산하였다. 이후 도시 밀도 지표인 용적률과의 상관관계는

다중선형회귀분석을 통해 검증하였다. 층수에 따른 차이는 상호작용 항을 통해 검증하였으며, 결과적으로 밀도와 증가율 간 양의 상관관계와 층수와의 상호작용을 확인하였다. 이는 저층 단지가 고층 단지에 비해 고밀화 시 더욱 빠르게 취약해짐을 의미한다.

고밀 단지에서 냉방 에너지 증가율이 높은 원인을 파악하기 위해 단지 고밀화에 따른 내부 녹지 비율, 단지 배치, 인동 간격 변화를 비교하였다. 먼저 단지가 고밀화될 경우 녹지 면적이 감소하였다. 특히 고밀 단지에서는 건축물이 중정을 둘러싸는 위요형 배치가 많고 HW비율이 낮았다. 1990년대 후반 용적률과 인동 간격 규제가 약했으며, 이 시기 고밀화에 유리한 판상 위요형 배치가 다수 지어졌기 때문이다. 이 경우 Sky-view Factor가 매우 낮으며 열 포집과 장파 복사 방해가 발생한다. 따라서 고밀단지에서는 녹지가 적고 원활한 열 방출이 이루어지지 않아 열섬효과가 강해지기 때문에 폭염 기간 취약한 것으로 해석된다.

고층 및 저층 단지를 비교한 결과 고층 단지가 녹지가 더 많으며 건폐율도 고밀화에 따라 천천히 증가한다. 폭염 기간에는 옥상 표면 온도가 월등히 높고 이는 최상층의 냉방 효율을 악화시키는데, 고층 단지가 이에 노출되는 세대가 적기 때문으로 해석된다. 고층 단지는 인동 간격이 더 넓고 시원한 고층 대기를 접하기 때문에 폭염 기간 통풍에 유리한 것으로 해석된다.

연구 결과를 바탕으로 폭염에 대응하는 고밀도시 정책들을 제안하였다. 폭염에 취약한 중정형 저층 고밀 지구의 경우 옥상 녹화, 쿨루프, Resilience Hub 등을 적극 고려해 볼 수 있다. 반대로 고층 타워형 지구의 경우 폭염 기간 열섬효과에는 상대적으로 강할 수 있으나 그늘이 적기 때문에 이를 보완하는 방안이 적절하다. 폭염이 빈번한 지역의 경우 통경축 확보 및 위요형 단지 지양 등 적절한 고밀화 가이드라인을 제시할 수 있다. 공중보건 측면에서도 저층 고밀하고 폐쇄적인 노후 주택 거주민에게 단열 및 창호 지원을 제공할 수 있다. 이러한 시사점들을 통해 도시계획 및 공중보건 분야에 기여하고자

한다.

향후 연구에서는 단지의 향, 다양성을 추가로 고려하고 시뮬레이션으로 연구 결과를 검증해야 한다는 필요성이 존재한다. 또한, 본 연구 결과는 덥고 습한(hot-humid) 기후에 한정된다는 한계점 역시 존재한다. 다만 본 연구를 통해 도시 고밀화의 지속 가능성을 폭염이라는 이상 기후 차원에서 재고한다는 점, 취약성을 완화하고 회복탄력성을 강화하는 방안을 제시한다는 점에서 의의가 있다. 결과적으로 도시의 빈번해지는 기후 위기 대응에 기여하고자 한다.

주요어 : 기후변화, 폭염, 고밀도시, 도시 고밀화, 냉방 에너지, 열섬효과, 공동주택 단지

학 번 : 2020-20778

목 차

제1장 서론

1절. 연구의 배경과 목적 ····· 01
1. 연구의 배경 ····· 01
2. 연구의 목적과 의의 ····· 03

2절. 연구의 방법과 흐름 ····· 04
1. 연구의 방법 ····· 04
2. 연구의 흐름 ····· 05

제2장 이론 및 선행연구

1절. 도시 밀도에 대한 이해 ····· 06

2절. 도시 밀도와 냉방 에너지 간 관계 ····· 07

3절. 냉방 에너지 영향 요인 ····· 09
1. 도시 환경 요인 ····· 10
2. 기타 요인 ····· 11

4절. 선행연구와의 차별성 ····· 12

5절. 연구 질문과 가설 설정 ····· 13

제3장 분석방법론

1절. 분석의 틀 ····· 14

2절. 연구의 범위 ····· 16
1. 공간적 범위 ····· 16
2. 시간적 범위 ····· 17

3절. 연구 설정 및 데이터 수집 ····· 18
1. 분석 단위 설정 및 샘플 수집 ····· 18
2. 변수 설정 및 데이터 수집 ····· 19

4절. 변수 계산 및 데이터 처리 ····· 21
1. 주요 변수 계산 ····· 21
2. 통제변수 계산 ····· 21
3. 변수 변환 및 이상치 제거 ····· 23

5절. 분석방법론 ····· 24
1. 회귀 모형 ····· 24
2. 샘플 세부 분석 ····· 24

제4장 분석 결과

1절. 기본 현황 분석 결과 ····· 25
1. 연도에 따른 에너지 사용량 변화 ····· 25
2. 기술통계 ····· 26
3. 건축년도에 따른 단지 특성 변화 ····· 27

2절. 다중회귀분석 결과 ····· 30

3절. 고층 및 저층 고밀화 비교 분석 결과 ····· 33

4절. 샘플 분석 결과 ····· 35
1. 밀도 및 층수에 따른 단지 배치 분석 ····· 35
2. 밀도 및 층수에 따른 인동 간격 분석 ····· 37

제5장 해석 및 고찰

1절. 결과 해석 및 고찰 ····· 39
1. 단지 고밀화와 폭염 기간 냉방 취약성 ····· 39
2. 고층 및 저층 고밀화의 취약성 차이 ····· 40
3. 폭염 저감 대책의 냉방 취약성 완화 효과 ····· 41

2절. 연구 의의 및 한계점 ····· 42
1. 연구 의의 및 시사점 ····· 42
2. 연구의 한계점 ····· 45

제6장 결론 ····· 46

참고문헌 ····· 47

부록 ····· 54
1. 건축년도에 따른 주민 연령대 분포 특성 ····· 54
2. 지역에 따른 단지 특성 차이 ····· 55
3. 회귀모형의 적합성 ····· 56

Abstract ····· 57

표 목 차

[표 1] 건축년도 분류에 따른 공동주택 단지 수 현황 ····· 22
[표 2] 최종 데이터 셋 변수들의 기술통계 ····· 27
[표 3] 다중회귀분석 결과 ····· 32
[표 4] 밀도 및 층수 범위별 아파트 단지 그룹 추출 ····· 35
[표 5] 단지 그룹별 판상 및 타워형 비율 ····· 35
[표 6] 샘플 분석 그룹별 단지 및 측정 지점 수 ····· 37
[표 7] 지역별 평균값 차이 비교 ····· 55
[표 8] VIF 분석 결과 ····· 56

그 림 목 차

[그림 1] 도시 밀도의 구분 ····· 06
[그림 2] 냉방 에너지 소비의 5단계 영향 요인 ····· 09
[그림 3] 연구 개념 흐름도 및 가설 설정 ····· 13
[그림 4] 연구의 공간적 범위 ····· 16
[그림 5] 분석 대상 아파트 단지 ····· 18
[그림 6] 단지 밀도 및 인근 녹지 비율 계산 영역 ····· 22
[그림 7] 공동주택 단지의 총 월별 전력 사용량 변화 ····· 25
[그림 8] 연도별 8월 냉방 에너지 사용량 ····· 26
[그림 9] 건축년도에 따른 단지 용적률 변화 ····· 29
[그림 10] 건축년도에 따른 단지 내 녹지 비율 변화 ····· 29
[그림 11] 단지 밀도와 냉방 에너지 증가율 간 산점도 및 추세선 ····· 31
[그림 12] 평균 층수에 따른 냉방 에너지 증가율 추세 비교 ····· 31
[그림 13] 고층단지와 저층단지의 녹지율, 건폐율, 표면비 변화 ····· 34
[그림 14] 그룹에 따른 위요형 배치 비율 ····· 36
[그림 15] 92-2000년 건축 비율 ····· 36
[그림 16] 배치 형태에 따른 Sky View Factor 차이 ····· 36
[그림 17] ‘ㅁ’자 및 ‘ㄷ’자 위요형 배치 단지 예시 ····· 36
[그림 18] 그룹별 샘플 단지의 위치 ····· 37
[그림 19] 밀도, 층수에 따른 인동 간격 및 HW비 변화 ····· 38
[그림 20] 연구 결과를 바탕으로 한 폭염 저감 대책 제안 ····· 44
[그림 21] 건축년도에 따른 노년층 인구 비율 변화 ····· 54
[그림 22] 건축년도에 따른 유소년층 인구 비율 변화 ····· 54

제1장 서론

1절 연구의 배경과 목적

1. 연구의 배경

최근 기후변화로 인해 폭염이 더욱 빈번하고 강하게 발생하고 있다. 2022년 서유럽, 인도, 미국 등지에서 극심한 폭염을 겪었으며, 유럽에서 1,700명이 넘는 사망자가 발생하였다. 이처럼 폭염은 도시 거주민의 열사병을 유발하여 치명률과 사망률을 높인다(Wong et al., 2013). 또한, 폭염 기간에는 실내에 적절한 온도를 유지하기 위해 냉방 에너지 수요가 급증한다. 이 경우 전력 과부하가 발생하며, 블랙아웃으로 인해 도시가 마비될 가능성이 있다. 특히 저소득층의 경우 적절한 냉방을 공급받지 못하여 에너지 빈곤 문제를 겪을 수도 있다. 이처럼 도시에 폭염이 닥칠 경우 정상적인 도시 기능은 위협받을 수 있다. 따라서 이 기간 도시 열 환경을 개선하고 냉방 수요 급증을 막을 필요가 있다.

도시 내에서도 고밀화된 도시지역이 이에 더욱 취약할 가능성이 있다. 고밀지역에서는 더욱 강력한 열섬효과가 발생하며 기온이 더 높기 때문이다. 고밀화된 도시에서는 반사율(Albedo)이 낮아 태양 빛을 흡수하는 건축물, 포장 면적이 넓고 상대적으로 녹지 면적이 감소한다. 또한, 사람들의 밀집된 활동은 교통수단과 전력 소비를 늘려 폐열을 발생시킨다. 이러한 영향은 고밀 도시의 냉방 에너지 소비를 증가시키는 경향이 있다(Sun & Augenbroe, 2014; Li et al., 2015; Ca et al., 2018). 이러한 경향성은 폭염 기간 열섬효과 강도가 증폭되기 때문에(Founda & Santamouris, 2017; Zong et al., 2021) 더욱 심해질 것으로 예상된다.

반면 도시 고밀화는 경제성 및 지속 가능성 측면에서 많은 장점이 있다. 토지를 압축적으로 사용하여 농경지와 자연 보존지역을 확보할 수 있으며, 인프라의 효용을 보다 많은 사람이 누릴 수 있다(Fertner & Große, 2016; Teller, 2021). 게다가 교통 에너지(Newman & Kenworthy, 1989)와 난방 에너지

(Godoy-Shimizu et al., 2019) 측면에서도 효율적이다. 도시 고밀화는 한정된 토지에 많은 주택을 공급할 수 있어 일부 국가에서는 적극적으로 추진하고 있다. 국내의 경우 서울시에서도 주택을 공급하기 위해 역세권 활성화 사업을 추진하고 있다(서울시, 2022). 고밀도시가 여러 이점이 있는 만큼 이를 누리되, 폭염 기간 취약성을 완화할 수 있는 적절한 고밀화 방식에 대한 논의가 필요하다.

고밀화 방식은 크게 수직 밀도(층수)를 늘리는 고층 고밀화와 수평 밀도(건물면적)를 늘리는 저층 고밀화 두 가지 유형으로 나눌 수 있다. 이러한 유형에 따라 건물의 배치와 인동 간격, 오픈스페이스와 녹지의 확보 여부가 달라진다. 이에 따라 두 고밀화 방식은 그늘의 양과 건물 표면 온도(정숙진・윤성환, 2015), 통풍 성능에 차이가 발생한다. 그러나 이러한 차이가 냉방 수요를 저감하고 폭염 기간 취약성을 완화할 수 있는지 아직 충분히 논의되지 않았다.

2. 연구의 목적과 의의

본 연구는 먼저 고밀화된 도시가 폭염 기간 더욱 냉방에 취약한지 실증적으로 확인하고자 한다. 다음으로 고층 고밀화와 저층 고밀화 중 어떠한 방식이 상대적으로 이를 완화할 수 있는지 집중적으로 살펴보고자 한다. 이후 두 고밀화 유형의 형태적 특성을 비교하고 해석하여 폭염 위기에 대응하는 적절한 고밀화 유형을 제시하고자 한다.

본 연구는 도시 고밀화의 지속 가능성을 일반적인 기후뿐만이 아닌 폭염이라는 이상 기후 차원에서 재고한다는 의의가 있다. 연구 결과를 통해 적절한 고밀화 유형과 방식을 제언하여 도시의 빈번해지는 기후 위기 대응에 기여하고자 한다. 또한 전 세계적으로 소득 수준의 증가와 온도 상승으로 향후 냉방 수요가 급증할 것으로 예상된다(Davis & Gertler, 2015). 본 연구는 냉방 효율이 좋은 적정한 도시 밀도와 형태에 대해 논의하여 냉방 에너지 저감 및 정책 수립에 기여하고자 한다.

2절 연구의 방법과 흐름

1. 연구의 방법

본 연구에서는 폭염 기간 냉방 취약성의 지표로 평년 대비 폭염 기간 냉방 에너지 증가율을 살펴보고자 한다. 실제 관측된 전기 에너지 사용량 데이터를 활용하여 고밀화된 지역에서 폭염 기간 강화된 열섬효과로 냉방 에너지가 더욱 증가할 것이라는 기존 가설을 통계적으로 검증한다. 이후 고층 단지와 저층 단지의 고밀화에 따른 증가율 변화를 살펴보고, 냉방 측면에서 효율적인 형태적 특성의 차이를 실측 데이터를 통해 비교한다.

먼저 문헌 조사를 통해 도시의 밀도를 정의하였으며, 정의된 밀도와 냉방 에너지와의 관계를 파악하였다. 또한, 도시 환경이 건축물 냉방 에너지에 미치는 영향 요소와 메커니즘을 파악하고, 기타 요인들을 분석하였다. 이후 다음과 같은 절차로 연구를 진행하였다.

첫째, 에너지 데이터를 병합하여 폭염 기간 냉방 에너지가 많이 증가함을 확인하고, 대상 아파트 단지의 기본 현황을 파악한다.

둘째, 회귀분석을 통해 단지 밀도와 폭염 기간 에너지 사용 증가율의 상관관계, 고층과 저층 단지의 증가율 변화를 통계적으로 검증한다.

셋째, 고층 단지와 저층 단지의 고밀화에 따른 녹지, 건폐율, 표면비 변화를 분석하여 취약성 차이의 원인을 발견한다.

넷째, 밀도 및 층수 별 단지를 선별하고 형태와 인동 간격 분석을 통해 고밀단지가 폭염에 취약한 원인을 발견하고 해석한다.

연구 결과를 바탕으로 폭염 기간 냉방 에너지가 급증하는 단지 특성들을 제안하고, 고밀도시의 폭염 기간 냉방 취약성에 대한 논의를 통해 기후변화 대응을 위한 정책적 함의를 제시한다.

2. 연구의 흐름

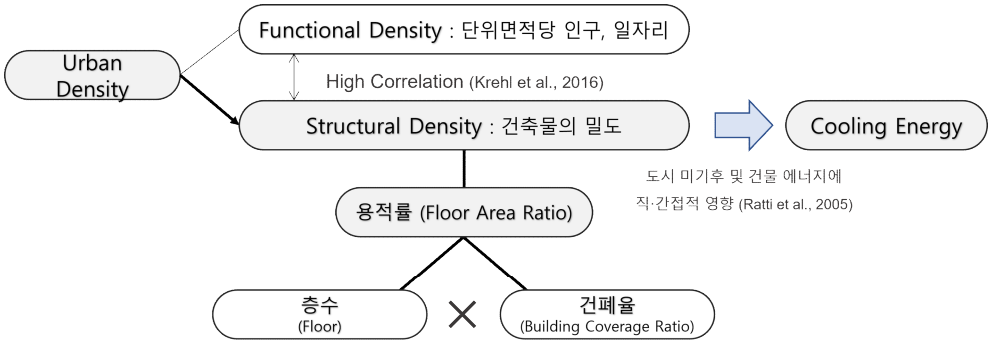
연구 과정	연구 내용	연구 방법
제1장 서론	연구의 배경 및 목적 수립 연구의 방법 설정	
제2장 이론 및 선행연구	도시 밀도에 대한 이해 도시 밀도와 냉방 에너지 간 관계 냉방에너지 영향 요인 - 냉방 에너지 소비의 영향 요인 단계 - 도시 환경 요인 - 기타 영향 요인	문헌조사
제3장 분석방법론	연구의 설정과 데이터의 수집 변수 계산 및 처리 분석방법론 - 다중회귀분석 - 샘플 세부 분석	문헌조사 GIS 분석 원격탐사
제4장 분석결과	다중회귀 분석 결과 배치 및 형태 특성 비교 결과	통계 분석 시각화 분석
제5장 해석 및 고찰	결과 해석 및 고찰 연구 의의와 한계점	
제6장 결론		

제2장 이론 및 선행연구

1절 도시 밀도에 대한 이해

도시 밀도는 크게 두 가지 차원에서 정의될 수 있다. 첫 번째는 기능적 밀도(Functional Density)이다. 이는 단위 면적당 얼마나 많은 인구, 일자리가 밀집하여 있는지 나타내는 지표이다. 다음은 구조적 밀도(Structural Density)이다. 이는 건축물의 밀도를 나타내며, 건축면적이나, 용적률, 건축물 부피 등의 지표로 정의될 수 있다(Teller, 2021). 두 밀도는 다른 의미를 가지나 밀접한 상관관계를 가진다. 그러나 도시 구조의 복잡성으로 예외적인 경우가 발생할 수 있다(Krehl et al., 2016). 본 연구에서는 도시 밀도를 구조적 밀도로 정의하고 측정하였다. 이러한 이유로는 건축물의 배치 및 형태가 도시 미기후 및 에너지 사용량에 직·간접적인 영향을 미치기 때문이다(Ratti et al., 2005). 따라서 대지 면적에 대한 건축물 바닥면적의 비율인 용적률(Floor Area Ratio)을 지표로 활용하였다.

용적률은 다시 건축물의 층수와 건폐율(Building Coverage Ratio)의 곱으로 분해할 수 있다. 따라서 같은 밀도를 가정한다 해도 층수가 높고 건폐율이 낮거나, 반대로 층수가 낮고 건폐율이 높은 두 가지 경우를 고려할 수 있다.



[그림 1] 도시 밀도의 구분

2절 도시 밀도와 냉방 에너지 간 관계

먼저 도시의 밀도가 증가하면 더욱 강력한 열섬효과가 발생하여 냉방 에너지 사용량이 증가한다는 연구 결과가 존재하였다. Sun & Augenbroe(2014)는 미국 대도시의 고밀한 도심 환경에서 더욱 강력한 열섬효과가 발생하며, 특히 마이애미의 오피스는 냉방 수요가 15% 증가할 수 있음을 보였다. Li et al.(2018)은 중국의 공동주택 가구들을 대상으로 설문을 진행하였다. 회귀분석 결과 여름철 전기 사용량은 근린의 용적률과 양의 상관관계를 나타내어 본 가설을 지지하였다.

반면 밀도가 증가할 경우 인동 간격이 좁아지고, 그늘효과로 인해 사용량이 감소한다는 결과 역시 존재하였다. Strømann-Andersen & Sattrup(2011)은 코펜하겐의 도시 형태에서 밀도가 증가하면 도시 협곡이 크게 좁아지며 과도한 그늘로 인해 냉방 에너지 수요가 감소함을 보였다. Tereci et al.(2013) 역시 독일의 기후와 건축물 조건에서 인근 건축물의 그늘이 많을수록 냉방 수요가 줄어듦을 밝혔다. 또한, 주택 형태에 따라 수요가 달라지며, 고밀 주거 형태에서는 중정형, 타워형, 판상형 아파트 순으로 점차 냉방 수요가 감소하였다.

두 가지 영향을 모두 고려하고 크기를 비교한 연구 역시 존재하였다. Li et al.(2015)의 경우 뉴욕을 대상으로 계산한 열섬효과, 그늘효과 강도와 전기 및 가스 에너지 수요 간 상관관계를 검증하였다. 분석 결과 전기 에너지는 열섬효과와 유의미한 양의 상관관계를 나타내었으나, 그늘효과와는 유의미하지 않았다. 반면 Salvati et al.(2017)의 경우 지중해 기후대에서 도시가 고밀화될 경우 열섬효과로 인한 냉방 증가보다 그늘로 인한 감소 효과가 더욱 강력하다는 결과를 제시하였다.

선행연구를 검토한 결과 도시 밀도와 냉방 에너지 간 관계가 음(-) 혹은 양(+)이라는 결과가 모두 존재하였다. 따라서 도시 고밀화가 냉방에 더욱 유리한지, 취약한지 단정 짓기 어려우며 그늘, 열섬효과의 고려 여부·강도와 기후

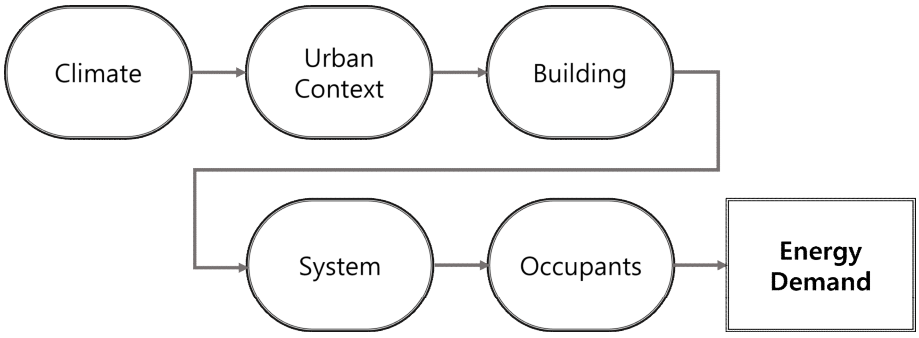
여건에 따라 다를 수 있다. 다만 여름철 습윤한 대륙 동안 지역들(중국 및 미국 동부)에서는 열섬효과로 인한 증가 효과가 주로 보고되었으므로, 한국을 대상으로 할 경우 도시 고밀화가 냉방 효율에 악영향을 끼칠 가능성이 크다.

열섬과 그늘효과 외에도 표면비(Surface-Volume Ratio)역시 냉방 효율에 영향을 미칠 수 있다. 표면비가 클 경우, 외부에서 실내로 열이 상대적으로 많이 유입될 수 있으며, 이는 실내 온도의 증가로 이어진다. 관련 연구 결과로 Vartholomaios(2017)은 표면비가 클수록 냉방 에너지가 증가하는 약한 양(+)의 상관관계를 밝혔다.

결과적으로 단지의 고밀화와 냉방 에너지 간 관계는 열섬효과, 그늘효과, 표면비 변화의 상호작용으로 복잡한 결과가 나타남을 알 수 있다. 이를 결정하는 것은 단지의 세부적인 형태이다. 단지의 밀도 지표인 용적률은 층수와 건폐율로 분해될 수 있다. 즉 층수가 높고 건폐율이 낮은 고층 고밀 형태, 층수가 낮고 건폐율이 높은 저층 고밀 형태가 존재하는 만큼 층수 형태에 따라 세부적인 분석이 필요하다.

3절 냉방 에너지 영향 요인

본 연구에서는 폭염 기간 냉방 에너지 증가율을 살펴보고자 하는 만큼 연구 대상인 냉방 에너지에 대해 폭넓게 이해할 필요가 있다. Ratti et al.(2005)은 냉난방 에너지 소비는 총 5단계의 영향을 받아 나타난다고 보았다(그림 2). 기후, 도시 환경, 건축물 특성, 냉난방 시스템, 그리고 사용자 행태이다. 기후는 해당 지역에서 나타나는 기온, 일조량 등의 날씨 조건이다. 도시 환경은 건물 외부의 조건들로 인근 건물들의 밀도와 높이, 주변 식생, 토지이용 등이 해당하며 미기후 조건을 변화시킨다. 건축물 특성은 건물 내부의 물리적 조건으로 내부 구조, 단열 및 밀폐 정도를 의미한다. 냉난방 시스템은 중앙난방 혹은 개별난방 등 냉난방 형태와 기기의 효율을 의미하며, 사용자 행태는 실제 에너지를 사용하는 사용자의 점유시간, 강도 등을 의미한다.



[그림 2] 냉방 에너지 소비의 5단계 영향 요인

1. 도시 환경 요인

어떠한 주변 도시 환경이 건물의 전기, 냉방 에너지 소비에 영향을 미치는지 많은 연구에서 규명하고자 하였다. 먼저 Wong et al.(2011)은 주변의 녹지 밀도, 건물 개수와 높이가 따른 오피스 건물의 냉방 에너지 사용량을 계산하였다. 실험한 결과 주변 건물의 양과 층수보다 녹지 피복의 양과 밀도가 냉방 에너지를 감소시키는 데 결정적인 영향을 미쳤음을 밝혔다, Ko & Radke(2014)의 경우 전기 사용량 데이터로 여름철 냉방 에너지를 계산하고 밀도, 향, 녹지와 수역, 식생이 얼마나 영향을 미치는지 회귀분석을 통해 검증하였다. 분석 결과 가로의 향과 100피트 내 녹지 밀도, 식생이 냉방 에너지에 유의미한 영향을 끼쳤다. Woo & Cho(2018)의 연구에서도 서울을 대상지로 비슷한 연구를 진행하였으며, 이 중 녹지와 여름철 전기 소비는 음(-)의 상관관계를 보였다.

전반적으로 녹지는 쿨 스팟으로 열섬효과를 완화하고 냉방 에너지 소비를 줄이는 데 큰 역할을 한다. 녹지는 식생의 증산작용과 캐노피 층 형성을 통해 온도를 낮추는 작용을 하기 때문이다(Gunawardena et al., 2017). Ca et al.(1998)의 연구에서는 도심 공원의 녹지가 1.5~2.5℃ 기온이 낮았으며, 100m에서 최대 700m까지 주변 도시지역을 냉각하는 효과가 있었다. 또한 인근 오피스 건물의 냉방 에너지를 15% 절감하였다. Toparlar et al.(2018)도 마찬가지로 공원이 인접한 경우 냉방 수요가 3-20% 감소하며, 오래된 단열성능을 가진 건물일수록 절감효과가 큼을 밝혔다.

녹지뿐만 아니라 주변 건축물의 형태 역시 냉방 에너지에 영향을 미치며, 밀도 외에도 다양한 요인이 존재한다. 먼저 Oh & Kim(2018)은 서울의 건물들을 대상으로 냉방 에너지와 건물의 둘레비, 향, 그리고 인근 도시협곡의 비율 간 상관관계를 밝혔으며, Liao et al.(2021)은 주변 건물의 협곡(HW)비가 여름철 냉방에 주요한 영향을 미침을 발견하였다.

2. 기타 요인

기후와 도시환경 요인 외에도 건축물 특성, 냉난방 시스템, 사용자 행태에 따라 건물의 에너지 소비는 달라진다. 먼저 건축물 특성 중 단열은 냉난방 에너지를 절약하는 대표적 수단이다. 적절한 단열은 열 유입과 손실을 막고 냉난방 부하를 감소시킨다. 단열 규제는 많은 국가에서 점차 강화되고 있기 때문에 건축년도와 밀접한 관련이 있다. 이 외에도 음미령・홍원화・이지애(2018)는 복도식 아파트가 계단식보다 가스 난방 및 총에너지를 적게 사용하는 것으로 나타났기에 냉난방 효율에 영향을 줄 수 있음을 밝혔다. 냉난방 시스템의 경우 대표적으로 개별, 중앙, 지역 냉난방 방식이 있다. 지역 냉난방의 경우 개별 냉난방에 비해 효율적이며, 에너지 사용량을 줄일 수 있다.

사용자 행태에 따라서도 냉난방 에너지 소비가 크게 영향을 받는다. 그러나 실제 점유시간, 행태 등을 직접적으로 측정하기 어렵다. 따라서 거주자의 특성에 따라 사용 패턴을 어느 정도 대체하였다. 먼저 세대 면적은 가구 구성과 큰 연관성이 있으며, 세대 구성원에 따라서도 냉방 강도가 달라질 수 있다. van den Brom et al.(2018)은 세대 면적이 크면 사용 밀도가 낮아 단위 면적당 에너지 사용량이 줄어들며, 1~2인 가구가 가족 단위 가구보다 단위 면적당 사용량이 적음을 보였다. 소득수준 역시 냉난방 사용량에 큰 영향을 미친다. 특히 냉방의 경우 소득이 낮으면 에어컨보다는 선풍기 등 다른 냉방 수단에 의존하고(Zhang et al., 2021; De Cian et al., 2019). 냉방을 짧은 시간동안 약하게 가동하기 때문에(Hu et al., 2020) 냉방 에너지 사용량이 감소한다. 고령층 및 유소년층 비율에 따라서도 폭염 기간 냉방 증가에 영향을 줄 수 있다. Chen et al.(2013)의 설문조사에서는 한국과 인접한 중국을 대상으로 하여 고령층일수록 여름철 냉방을 약하게 설정하는 경향을 발견하였다. 따라서 연령층에 따라 냉방 에너지 수요가 변화할 수 있다.

4절 선행연구와의 차별성

많은 선행연구에서 도시 밀도와 냉방 에너지 사이의 관계를 살펴보고자 하였다. 고밀화로 인한 열섬효과는 냉방 수요를 증가시키며 반대로 그늘과 표면비 감소는 냉방 수요를 감소시킨다. 상반된 두 효과의 상호작용으로 고밀화와 냉방 간 상관관계가 결정된다.

본 연구에서는 먼저 폭염이라는 특수한 재난 상황을 고려하였다. 폭염 기간에는 고밀화 시 냉방 비효율의 원인이 되는 열섬효과가 더욱 증가하며 이는 도시의 취약성을 극대화한다. 따라서 냉방 에너지 측면에서 취약성을 측정하고 이와 도시 밀도 간 상관관계를 분석하였다. 폭염 기간 냉방 취약성은 평년 대비 증가율(%)로 측정하였다. 기타 요인을 통제할 경우 냉방 취약성이 높으면 폭염 기간 열 환경이 크게 악화하어 냉방 수요가 급증함을 의미한다.

다음으로 층수에 따라 세부적인 고밀화 유형을 구분하여 분석하였다. 밀도는 층수와 건폐율로 분해되며, 고밀화될 경우 층수가 증가하는 고층 고밀화와 건폐율이 증가하는 저층 고밀화가 존재한다. 두 고밀화 방식에 따라 열섬효과 강도와 그늘이 다르므로 구분하여 이해할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 두 방식의 형태적 차이를 비교하여 냉각, 통풍 등 열 환경 관점에서 해석하고자 한다.

이를 종합하면, 폭염이라는 특수한 상황에서 도시 고밀화에 따른 냉방 취약성을 본다는 점, 폭염 기간 더 취약한 고밀화 형태를 발견하고 이를 완화할 수 있는 특성들을 제시한다는 점에서 본 연구는 차별성을 지닌다.

5절 연구 질문과 가설 설정

본 연구 질문과 가설은 다음과 같다.

- 고밀화된 도시는 폭염 기간 냉방에 더욱 취약한가?

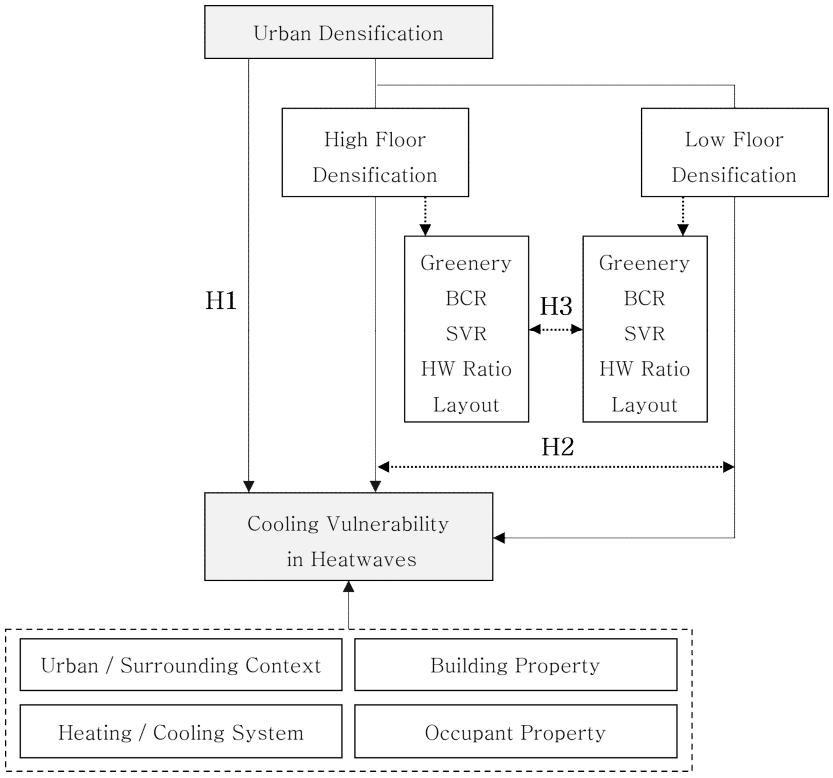
H1 : 폭염 기간에는 고밀화로 인한 열섬효과 요인이 더욱 강해지므로, 단지 밀도는 폭염 기간 냉방 에너지 증가율과 양(+)의 상관관계를 가질 것이다.

- 고층 고밀화, 저층 고밀화 중 어떠한 형태가 더욱 취약한가?

H2 : 고층 단지와 저층 단지를 구분할 경우, 밀도와 냉방 에너지 증가율 간 기울기에 유의미한 차이가 있을 것이다.

- 어떠한 형태적 특성의 차이로 인해 이러한 결과가 발생하는가?

H3 : 고층 단지와 저층 단지는 고밀화될 경우 녹지 비율, 건폐율, 표면비(Surface Volume Ratio), HW비, 형태에서 차이를 보일 것이다.



[그림 3] 연구 개념 흐름도 및 가설 설정

제3장 분석방법론

1절 분석의 틀

본 연구에서는 네 가지 절차를 통해 폭염 기간 냉방에 취약한 고밀화 형태를 실증적으로 탐색해보고자 한다. 먼저 수도권 공동주택 단지의 냉방 에너지 증가를 확인한 후 기본 현황을 살펴본다. 다음으로 폭염 기간 냉방 에너지 증가율과 단지 밀도(용적률)와의 상관관계를 살펴본 후. 층수와의 상관관계는 다중회귀분석을 통해 확인한다. 이를 통해 평균 층수가 늘어나는 고층 고밀화와 건폐율이 늘어나는 저층 고밀화 중 어떠한 방식이 폭염 기간 더 취약한지 확인한다. 세 번째로 전체 고층, 저층 아파트 단지를 대상으로 밀도에 따른 녹지, 건폐율, 표면비 변화를 살펴본다. 이후 밀도 및 층수별로 아파트 단지를 선별하여 배치 형태, 인동 간격, HW 비율을 분석한다. 이러한 과정을 통해 고밀 단지의 형태적 특성을 확인하고, 저층 및 고층 두 고밀화 방식의 차이점을 다각도로 확인한다. 이를 바탕으로 폭염에 대응할 수 있는 도시 고밀화 방안 및 정책을 논의하고자 한다. 분석 과정은 주로 Python의 Geopandas, Statsmodels 패키지와 QGIS를 이용하였다,

1. 기본 현황 분석
- 연도 및 월별 전력·냉방 에너지 사용량 시각화 - 기술 통계 분석 - 건축년도에 따른 단지 특성(밀도, 녹지) 변화 분석

↓

2. 다중 회귀 분석
- 단지 밀도와 폭염 기간 냉방 에너지 증가율의 상관관계 분석 - 단지 밀도와 평균 층수 간 상호작용 항을 포함한 다중회귀분석

↓

3. 고층 및 저층 고밀화 비교 분석 결과
- 건폐율, 녹지율, 표면비 변화 분석

↓

4. 샘플 분석
- 단지의 위요 형태 분석 - 샘플 단지의 인동 간격 및 HW 비율 분석

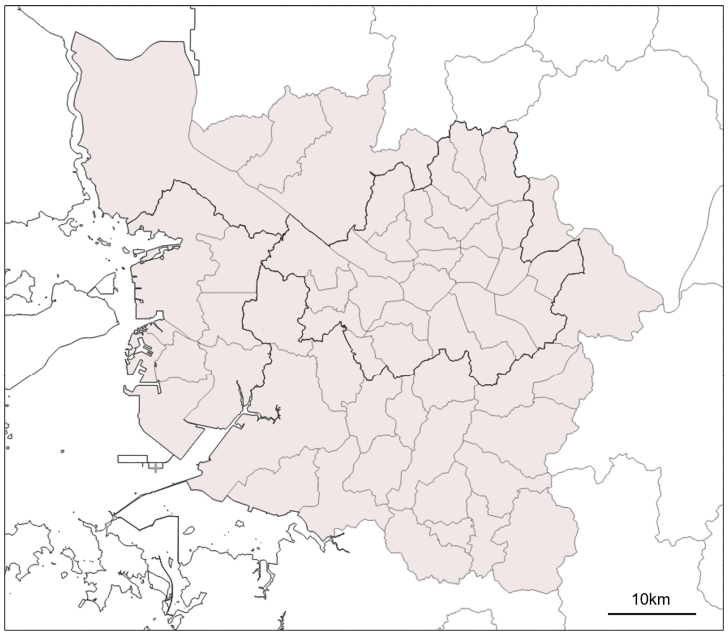
↓

폭염 기간 덜 취약하고 냉방 에너지 수요 급증에 대비할 수 있는 단지 고밀화 형태 특성 발견 및 해석

2절 연구의 범위

1. 공간적 범위

본 연구의 공간적 범위는 수도권역이며, 서로 근접하고, 인구가 밀집하며 시가화 지역이 많은 서울특별시, 인천광역시(도서 지역 제외), 경기도 부천시, 고양시, 김포시, 시흥시, 광명시, 안산시, 안양시, 군포시, 과천시, 의왕시, 수원시, 용인시(수지구, 기흥구), 성남시, 하남시, 구리시를 대상으로 한다. 단열 기준이 다른 경기 북부(동두천, 포천) 지역은 제외한다. 대상지의 중심도시인 서울은 지난 100년간 기온이 1.8℃ 상승하였으며 전 세계 평균인 0.75℃를 상회한다(기상청, 2012). 대상지 및 인근은 고온다습한 여름철 기후를 가지고 있으며, 에어컨 보급률 또한 높다. 기온 상승이 가파르게 일어나고 있고, 냉방이 널리 보급되어 있기 때문에 폭염 기간 냉방 에너지 사용량을 측정하기 적합하다.



[그림 4] 연구의 공간적 범위

2. 시간적 범위

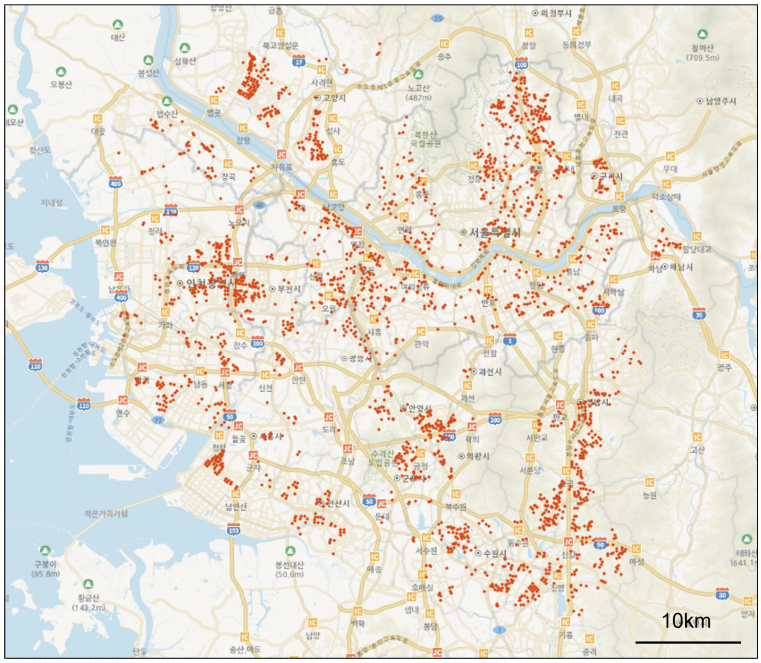
본 연구의 시간적 범위는 2017년~2021년 5월과 8월이며, 특히 수도권이 기록적인 폭염을 겪은 2018년을 중심으로 분석하였다. 2018년 8월 평균기온은 28.8℃로 다른 해에 비해 2.5℃ 높았으며, 최고기온 역시 관측 이래 사상 최고치인 39.6℃를 달성하였다. 2018년 8월 폭염일수 역시 19일로 평년 평균인 5.9일을 크게 상회한다. 이를 통해 2018년 수도권 지역에 극심한 폭염이 발생했음을 알 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 폭염 재난 상황의 냉방 에너지 증가를 집중적으로 살펴보았다.

3절 연구 설정 및 데이터 수집

1. 분석 단위 설정 및 샘플 수집

본 연구의 분석단위는 수도권 공동주택(아파트) 단지들을 대상으로 한다. 공동주택(아파트)은 건물 에너지 사용에서도 가장 큰 비율을 차지하며(서울 기준 약 29%) 단지 규모로 고밀화 개발이 이루어진다. 공동주택의 위치 정보와 필지 정보를 먼저 병합하였으며, 국가공간정보포털 국가중점데이터의 토지 특성 정보[1]와 K-apt 공동주택정보[2]의 주소를 기준으로 병합하였다.

공동주택 중 건축년도가 2016년 이후인 단지들은 전기 사용량 수집 기간과 가깝기 때문에 분석 대상에서 제외하였다. 주상복합 단지들, 임대 주택 비율이 세대 수 기준으로 25% 이상인 단지들, 중앙 및 지역 냉방을 가동하는 단지들은 제외하였으며, 수도권 내 총 2,257개 단지를 1차적으로 선별하였다.



[그림 5] 분석 대상 아파트 단지

1) 국가공간정보포털(http://www.nsdi.go.kr/lxportal/)에서 찾을 수 있다.
2) K-apt 공동주택관리정보시스템(http://www.k-apt.go.kr/)에서 찾을 수 있다.

2. 변수 설정 및 데이터 수집

본 연구에서 주요하게 보고자 하는 독립변수와 종속변수는 단지 밀도와 폭염 기간 냉방 에너지 증가율이다. 또한, 평균 층수는 단지 형태의 조절 변수로써 고려하였다. 각 변수를 계산하기 위해 수집한 데이터 출처는 다음과 같다.

・단지 밀도(독립 변수), 평균 층수(조절 변수) : 국가공간정보포털 국가중점데이터 중 GIS 건물통합정보를 사용하였다[3] 본 데이터는 전국 건축물들의 위치 및 도형, 용도, 연면적, 높이 등 다양한 정보를 제공한다. 도시 밀도 계산에는 연면적 정보를 활용하였다.

・폭염 기간 냉방 에너지 증가율(종속 변수) : 건축데이터 민간 개방 시스템의 지번별 에너지 사용량 데이터[4]를 사용하였다. 본 데이터는 전국 건축물들의 월별 전기 사용량을 지번 단위로 제공한다. 단, 단독주택과 300세대 미만 공동주택은 공개되지 않아 분석에서 제외하였다.

다음으로 건축물 에너지 사용량에 영향을 미치는 요인들을 바탕으로 통제 변수를 설정하였다. 먼저 도시 및 주변 형태 요인으로 인근 녹지 비율과 해발고도를 통제 변수로 설정하였다. 해발고도가 높으면 기온과 표면 온도가 낮아 열섬효과 강도가 감소하므로(Giridharan et al., 2004) 포함하였다.

・인근 녹지 비율 : 환경공간정보서비스의 세분류 토지피복[5] 정보를 활용하였다. 본 데이터는 산림, 공원 등의 대형 녹지뿐만 아니라 아파트 단지 내 녹지, 저층 주거지 내 미개발 녹지 등 소규모의 녹지 피복 정보 역시 포함하고 있다. 본 데이터에서 산림, 초지 영역을 따로 추출하였다.

・해발고도 : 국가공간정보포털의 수치표고모델(90M) 정보를 활용하였다. 본 데이터는 90M 픽셀 단위로 해발고도 정보를 제공한다.

---

3) 국가공간정보포털(http://www.nsdi.go.kr/lxportal/)에서 찾을 수 있다.
4) 건축데이터 민간 개방 시스템(https://open.eais.go.kr/main/main.do)에서 찾을 수 있다.
5) 환경공간정보서비스(https://egis.me.go.kr/)에서 찾을 수 있다.

건축물 특성과 냉난방 시스템으로 복도 및 계단식 여부, 건축년도, 평균 세대 면적, 난방 방식을 통제하였으며, 이는 공동주택관리정보시스템에서 수집하였다. 거주자 특성의 경우, 가구 평균 소득과 고령자 및 유소년 비율을 통제하고자 하였다. 그러나 평균 소득의 경우, 직접적으로 파악하는 것이 쉽지 않기 때문에 단지의 평당 거래가격을 파악하였다. 이는 국토교통부의 실거래가 공개시스템[6]을 통해 부동산 가격이 안정되었던 2017년 7월~2018년 6월 기간을 수집하였다. 단지의 고령층, 유소년층 비율의 경우, 국토정보플랫폼 국토통계지도[7]의 100*100M 격자 단위 인구 데이터를 활용하였다.

6) 국토교통부 실거래가 공개시스템(http://rt.molit.go.kr/)에서 찾을 수 있다.
7) 국토정보플랫폼(http://map.ngii.go.kr/mn/mainPage.do)에서 찾을 수 있다.

4절 변수 계산 및 데이터 처리

1. 주요 변수 계산

먼저 주요 독립변수인 단지 밀도는 단지 필지 내 건축물들의 연면적 총합을 토지 면적으로 나눈 용적률(FAR)로 계산하였다. 종속변수는 평년 대비 폭염 기간 냉방 에너지 증가율(%)이다. 먼저 각 년도 8월의 사용량에서 전력 소비가 가장 적은 5월 사용량을 빼어 냉방 에너지 사용량을 계산하였다(식 1). 이렇게 실측 전기소비량에서 냉방 에너지 소비량을 역추산하는 방법은 Su et al.(2021)의 연구에서 활용되었다. 다음으로 나머지 4개년도의 8월 냉방 에너지 사용량 평균값을 구한 후(식 2), 2018년 냉방 에너지 사용량에서 이를 나누어 비율과 증가율을 구하였다(식 3, 식 4). 조절 변수인 단지 평균 층수의 경우, 단지 연면적을 건축면적으로 나누어 계산하였다.

$$E_{cool} = E_{AUG} - E_{MAY} \quad (1)$$

$$E_{AVGcool} = (E_{2017cool} + E_{2019cool} + E_{2020cool} + E_{2021cool})/4 \quad (2)$$

$$HWRatio = E_{2018cool}/E_{AVGcool} \quad (3)$$

$$Y = HWIncreased_{\%} = 100 \times (\frac{E_{2018cool}}{E_{AVGcool}} - 1) \quad (4)$$

2. 통제변수 계산

통제변수인 인근 녹지 비율의 경우, 선행연구의 영향권을 고려하여 계산하였다. 먼저 Stewart & Oke(2012)는 인근 지역의 대기가 유입되어 영향을 주고받는 미기후 영향권 반경이 최소한 200~500m가 되어야 한다고 주장하였다. Kim et al.(2019)에서는 건물 에너지에 영향을 미치는 도시 녹지의 영향권을 반경 300m로 제시하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 단지 경계로부터 400m 반경을 설정하고, 영역 내 녹지 피복 면적의 비율을 계산하였다.

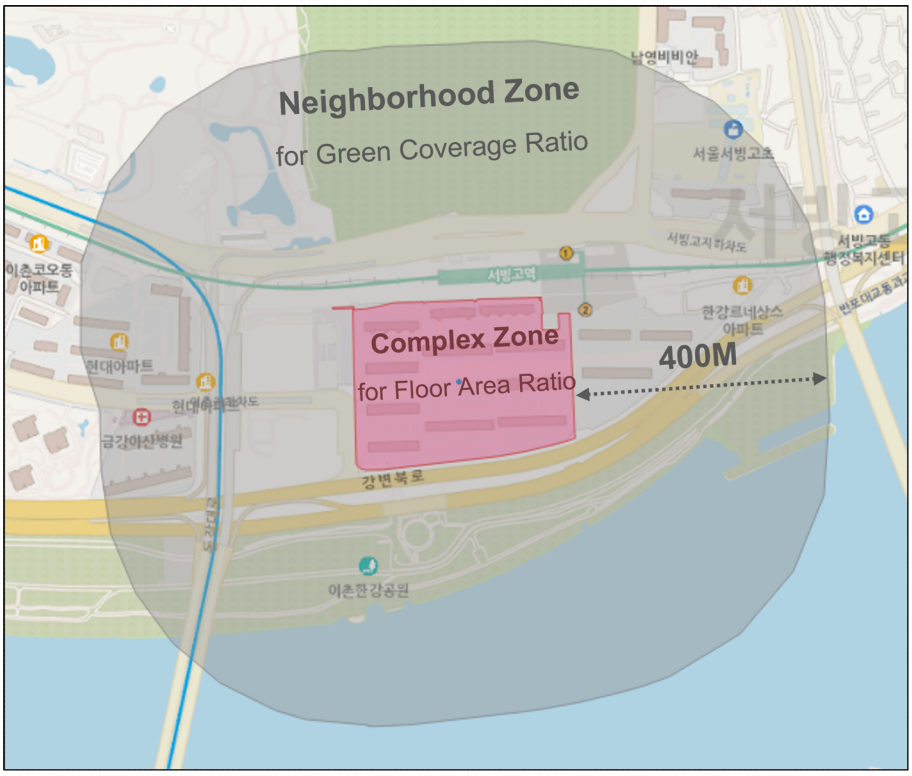
건축년도의 경우, 단열 규제의 변화를 바탕으로 단계별로 구분하였다. 건축물의 단열 규제는 1980년 처음 제정된 이래 꾸준히 강화되어 왔으며, 총 9번

개정되었다. You & Kim(2018)은 변화가 크고 주요한 법 개정을 기준으로 하여 건축물의 단열 성능을 5단계로 구분하였으며, 본 연구에서는 이 중 4단계를 차용하였다. 단계별 단지 수는 표 1과 같다.

고령층 및 유소년 인구 비율의 경우, 각 단지 영역에 포함되는 격자들의 인구 값을 활용하였다. 격자 내의 총인구, 고령층 인구, 유소년층 인구를 구한 다음 비율을 계산하였다.

[표 1] 건축년도 분류에 따른 공동주택 단지 수 현황

분류	1988년 이전	1989~2000년	2001~2010년	2011년 이후
단지 수	216	1232	767	42



[그림 6] 단지 밀도 및 인근 녹지 비율 계산 영역

3. 변수 변환 및 이상치 제거

일부 변수들의 경우 왼쪽으로 편향(Skew)된 분포를 보이며, 이는 회귀모형의 정확도에 영향을 줄 수 있다. 종속변수인 폭염 기간 냉방 에너지 증가율과 평당 거래가격의 경우, 이러한 이유로 로그 변환을 실시하였다.

변수를 계산하는 과정에서 단지 내 층수가 과다 추정된 건물이 있는 경우(60층 이상), 단지 밀도가 용적률 일반상업지역 조례 이상인 경우, 실제 고시된 용적률과 50% 이상 큰 차이가 있으면 분석 대상에서 제외하였다. 종속변수를 기준으로 이상치를 제거하였으며, 사분위수 범위로 판별하는 IQR 기법을 활용하였다. 이상치 판별 범위는 식 (5)와 같으며, 최종적으로 1,946개의 아파트 단지를 추려 분석하였다.

$$[Q_1 - 3(Q_3 - Q_1), Q_3 + 3(Q_3 - Q_1)] \quad (5)$$

5절 분석방법론

1. 회귀 모형

본 연구에서는 회귀모형을 바탕으로 폭염 기간 냉방 에너지 증가율과 단지 밀도 간 상관관계를 검증하였다. 종속변수와 평당 거래가격은 로그 변환을 진행하였기 때문에, 기본적인 모형 식은 식 (6)와 같다. 또한, 층수에 따른 기울기의 변화를 검증하기 위해 상호작용 항을 추가하였으며, 이는 식 (7)과 같다. 회귀모형을 통해 단지 밀도의 영향을 파악하고, 층수와의 상호작용을 파악하여 폭염 기간 냉방에 취약한 고밀화 형태를 발견하였다.

$$\log(Y_i) = \beta_0 + \sum_j \beta_j X_{ij} + \sum_k \log(\beta_k X_{ik}) + \epsilon_i \quad (6)$$

$$\log(Y_i) = \beta_0 + \beta_{int} X_{i1} X_{i2} + \sum_j \beta_j X_{ij} + \sum_k \log(\beta_k X_{ik}) + \epsilon_i \quad (7)$$

2. 샘플 세부 분석

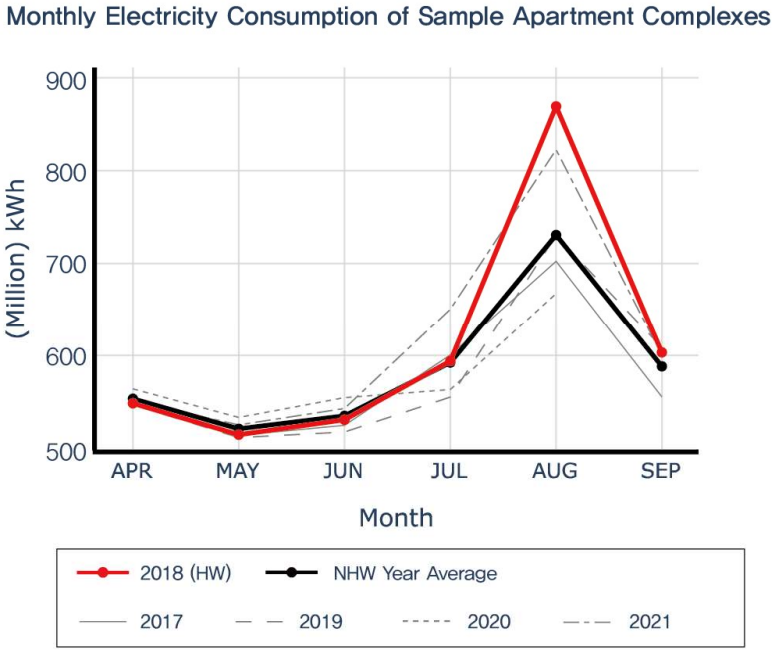
세부적인 단지 배치 요인들을 살펴보기 위하여 고층 초 고밀형, 고층 고밀형, 저층 고밀형, 고층 저밀형, 저층 저밀형 총 5가지 유형의 아파트 단지들을 선별하였다. 이들 아파트 단지가 건물이 위요하는 배치를 가지는지 직접 세어 분석하였다. 인동 간격 및 HW 비율 측정의 경우 각 유형에서 5개씩 랜덤으로 선별하였다. 이를 통해 어떠한 배치 특성 때문에 밀도별, 층수별 폭염 기간 냉방 취약성에 차이가 발생하는지 해석하고자 한다.

제4장 분석 결과

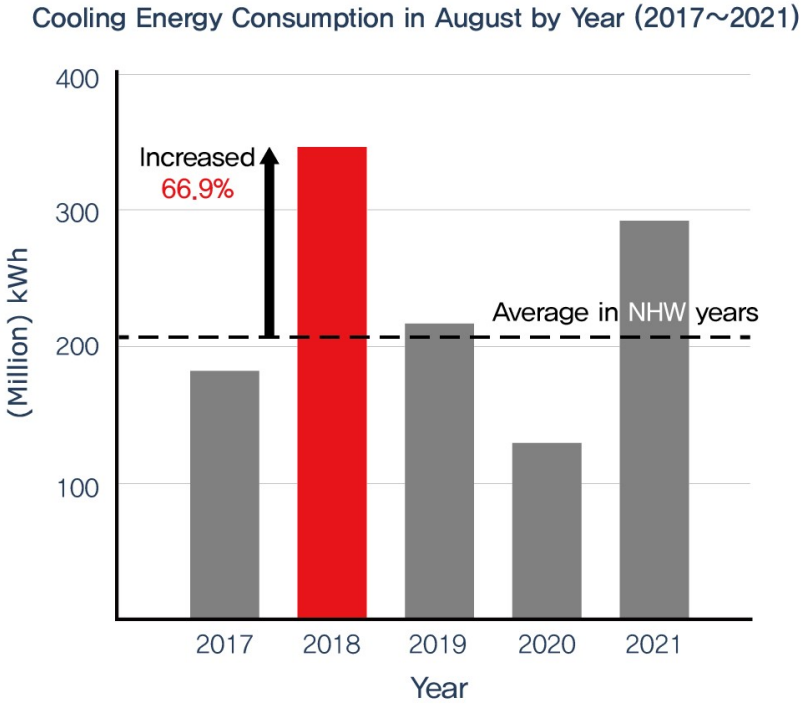
1절 기본 현황 분석 결과

1. 연도에 따른 에너지 사용량 변화

대상 주거단지들의 총 월별 전력 사용량을 시각화한 결과 모든 연도에서 5월에 전력 사용량이 가장 낮았으며, 평균기온이 가장 높은 8월에 전력 사용량이 가장 많았다. 또한, 폭염이 발생한 2018년 8월의 경우, 전력 사용량에서 평년과의 차이가 크게 벌어졌다(그림 7). 식 (1)과 식 (2)를 통해 냉방 에너지 사용량을 계산하여 비교한 결과 2018년 8월 폭염 기간 냉방 에너지 사용량은 평년 평균에 비하여 66.9% 급증하였다(그림 8). 이를 통해 폭염 기간 공동주택의 냉방 에너지 수요가 급증하며 과도한 전력 부하가 발생함을 알 수 있다.



[그림 7] 공동주택 단지의 총 월별 전력 사용량 변화



[그림 8] 연도별 8월 냉방 에너지 사용량

2. 기술 통계

식 (3), 식 (4)를 통해 대상 주거단지들의 폭염 기간 냉방 에너지 증가율을 계산한 결과, 폭염 기간 냉방 에너지가 최소 16%부터 최대 150%까지 증가한 단지들이 고루 분포하였다. 주요한 독립변수인 용적률의 경우, 71%부터 555%까지의 범위를 가지며, 평균 층수는 2층부터 25층까지 고층과 저층 단지가 고루 혼합되어 있다. 최종 데이터 셋에서 건축물의 단열 성능 및 형태와 큰 연관성이 있는 건축년도는 대부분 1989년~2010년에 밀집되어 있다. 1989년 이전에 지어진 아파트의 경우 재건축되거나 대단지인 경우가 많아 샘플 수가 적으며, 2010년 이후의 경우 토지 도형 정보가 정리되지 않거나 에너지 사용량 측정값이 이상치인 경우가 많아 샘플 수가 적었다.

[표 2] 최종 데이터 셋 변수들의 기술통계

(n = 1949)

Variable		Mean	Std.	Min	Med	Max
CE increased in HW	*(Dependent Variable)*	68.85	22.76	16.12	64.28	149.72
	(log scaled)	4.18	0.31	2.78	4.16	5.01
Complex Density	*(Independent Variable)*	2.37	0.59	0.71	2.32	5.55
Average Floor	*(Moderator Variable)*	11.67	2.72	2.31	11.80	24.88
Covariates	Green Coverage Ratio	0.28	0.14	0.01	0.25	0.81
	Altitude	36.29	28.23	2.03	27.35	182.21
	Heating Type[1]					
	Individual Heating	0.46	0.50	0	0	1
	Central Heating	0.03	0.18	0	0	1
	Regional Heating	0.51	0.50	0	1	1
	Construction Year					
	Before 1988	0.10	0.31	0	0	1
	1989-2000	0.52	0.50	0	1	1
	2001-2010	0.35	0.48	0	0	1
	After 2011	0.02	0.14	0	0	1
	Corridor Type					
	Stair Type	0.64	0.48	0	1	1
	Corridor Type	0.12	0.32	0	0	1
	Mixed Type	0.24	0.43	0	0	1
	Avg Household Area (㎡)	82.78	22.81	31.98	81.49	187.72
	Price Per Unit (10k₩/㎡)	555.00	299.40	171.37	469.06	2469.54
	(log scaled)	6.21	0.43	5.14	6.14	7.81
	Elder Population Ratio	0.12	0.04	0.03	0.12	0.31
	Youth Population Ratio	0.13	0.04	0.05	0.12	0.29

[1] All Cooling Systems are individual Cooling

3. 건축년도에 따른 단지 특성 변화

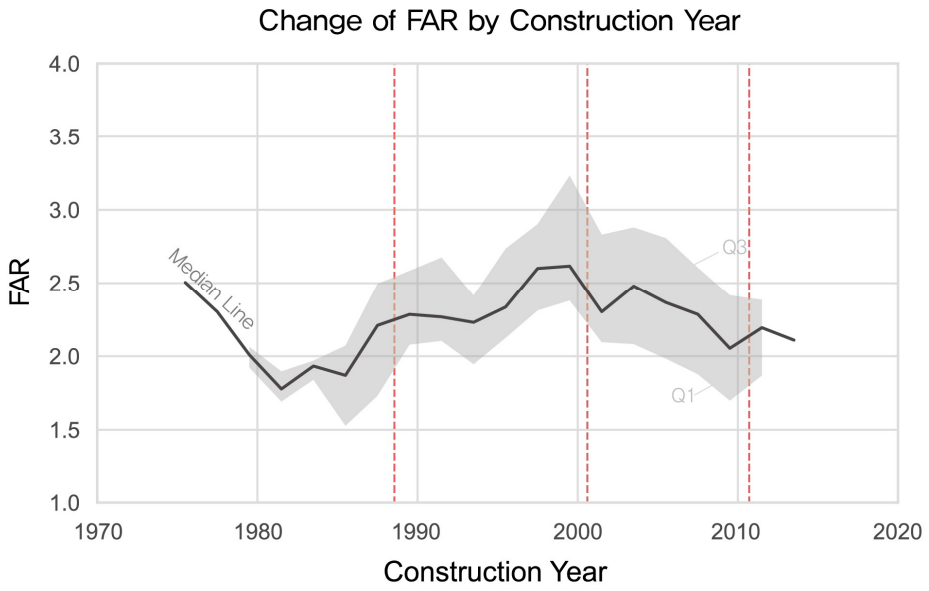
아파트 단지는 지어질 당시의 법 제도와 정책, 공급자 및 수요자들의 선호에 따라 건축적 특성이 달라진다(이상진・박소현, 2019). 따라서 단지의 냉방 효율에 영향을 미칠 수 있는 용적률, 단지 내 녹지 비율 변화를 건축년도에 따라 살펴보았다.

용적률은 1980년 이후 높아지다가, 2000년 이후 낮아지는 경향을 보이며 1995년~2000년 사이에서 가장 높다(그림 9). 1988년부터 2000년까지 3종 일반주거지역의 법정 상한 용적률은 현행 300%보다 높은 400%였으며(맹다미 외 2인, 2017), 1992년부터 2005년까지 인동 간격은 높이의 0.8배 이상만 확보되면 되었다.[8] 따라서 당시 지어진 단지들은 제도적으로 고밀화하기 유리하였다.

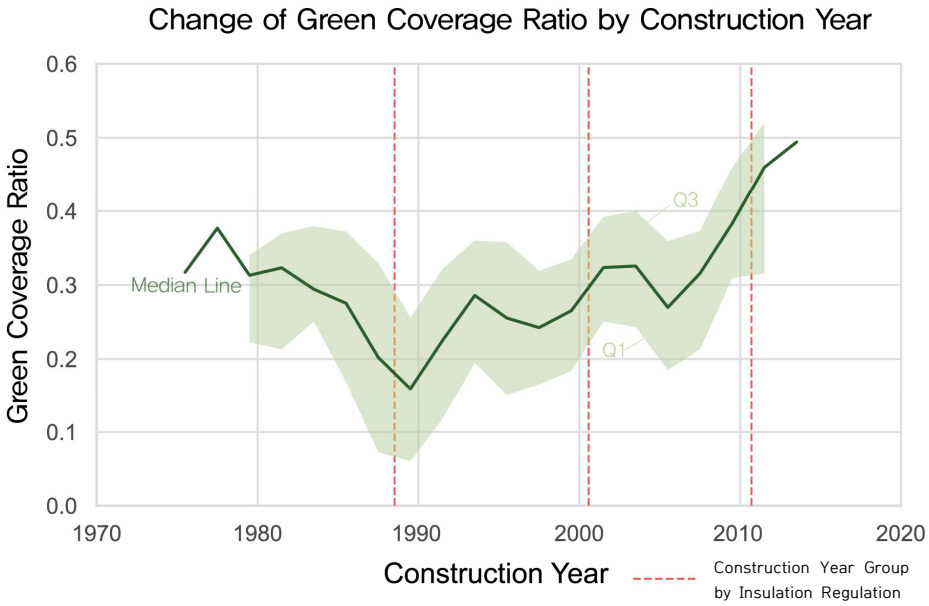
또한, 90년대 당시 200만 호 건설 계획에 따라 대량의 주택이 아파트로 공급되었다(서울연구원, 2003). 이때 용적률을 높이면 세대 수를 추가로 확보할 수 있었기 때문에 고밀한 단지가 다수 지어졌을 것으로 해석된다.

단지 내 녹지의 양은 1990년까지 감소하다가 이후에 증가하는 추세를 보인다(그림 10). 1990년 이전에는 세대당 주차 공간이 증가하면서 지상의 녹지가 주차장으로 전환되었다. 이후 지하 주차장이 등장하면서 지상부 주차장이 점차 녹지로 활용되었다. 최근에는 지상부 전면 보행화 단지가 등장하고 단지가 저밀화되면서 녹지 비율이 급격히 늘어났다.

8) 건축법 시행령 제86조 참고.



[그림 9] 건축년도에 따른 단지 용적률의 변화



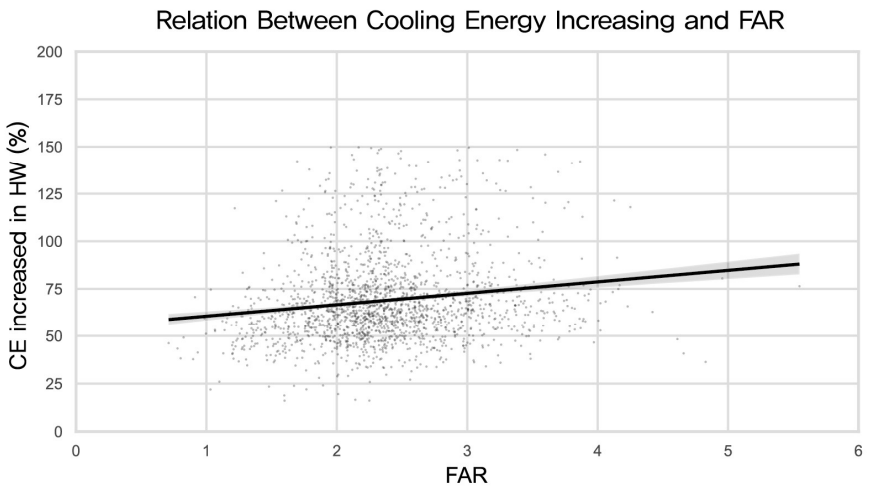
[그림 10] 건축년도에 따른 단지 내 녹지 비율 변화

2절 다중회귀분석 결과

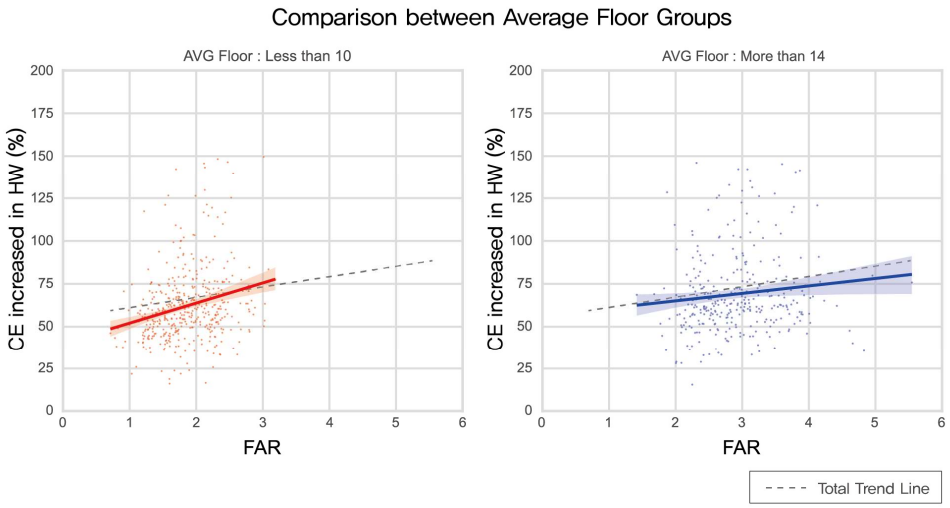
다중선형회귀 분석을 통해 단지 밀도와 냉방 에너지 증가율 간 상관관계를 분석한 결과 유의미한 양의 상관관계를 가졌다(표 3). 이는 고밀화된 단지에서 폭염 기간 냉방에 더욱 취약하며 냉방 소비 증가율이 더욱 크다는 것을 의미한다. 추세선을 선형으로 가정할 경우(그림 11) 용적률이 100%인 단지는 평균적으로 냉방 에너지가 61% 증가하나 용적률이 400%인 단지는 평균적으로 79% 증가하였다.

평균 층수에 따라 이러한 경향성에 차이가 존재하는지 통계적으로 검증하기 위하여 층수와 밀도 간 상호작용 항을 포함하였다(표 3). 분석 결과 상호작용 항은 음(-)의 부호로 유의미하였다. 이차항을 포함하여 좀 더 정확한 상호작용을 검증할 수 있으며(Cortina, 1993), 검증 결과 이차항이 유의하지 않음에도 불구하고 상호작용이 보존되었다. 이는 평균 층수가 높아짐에 따라 단지 밀도의 계수가 감소함을 의미하며, 층수가 높은 단지가 낮은 단지에 비해 고밀화 시 폭염 기간 냉방에 덜 취약해짐을 의미한다. 이는 산점도 및 추세선 그래프(그림 12)를 통해 확인할 수 있다. 평균 14층 이상의 고층 단지와 10층 이하의 저층 단지를 분류하여 따로 분석한 결과 저층 단지는 고층 단지에 비해 기울기가 가파르다.

주변 환경요인으로 포함된 인근 녹지 비율은 음의 상관관계를 나타내었으며, 1989년 이후 건축년도가 최신인 그룹일수록 증가율이 작은 경향이 있다. 이를 통해 녹지와 단열이 폭염을 완화하는 효과가 있음을 추정할 수 있다. 내부 구조가 복도식인 경우 폭염 기간 덜 취약하며, 세대 면적이 큰 경우에는 냉방 수요가 급증한다. 마찬가지로 고령층이 많은 단지는 평년에 비해 폭염 기간 냉방을 더 많이 가동하는 경향이 있었다.



[그림 11] 단지 밀도와 냉방 에너지 증가율 간 산점도 및 추세선



[그림 12] 평균 층수에 따른 냉방 에너지 증가율 추세 비교

[표 3] 다중회귀분석 결과

Y : log(CE increasing in HW : %)

	Linear	Interaction	with Quadratic Term
Floor Area Ratio			
Linear Term	0.0751***	0.2137***	0.2108**
	(0.0136)	(0.0420)	(0.0703)
Quadratic Term			0.0011
			(0.0211)
Average Floor		0.0322***	0.0327*
		(0.0076)	(0.0129)
FAR × avg Floor		−0.0125***	−0.0128*
		(0.0031)	(0.0053)
Green Coverage Ratio (Range = 400m)	−0.1781**	−0.1647**	−0.1651**
	(0.0608)	(0.0606)	(0.0610)
Altitude	−0.0009**	−0.0008**	−0.0008**
	(0.0003)	(0.0003)	(0.0003)
Heating Type[1)]			
Central Heating (1 = yes)	0.0093	−0.0012	−0.0012
	(0.0394)	(0.0393)	(0.0393)
Regional Heating (1 = yes)	0.0582***	0.0459**	0.0459**
	(0.0161)	(0.0164)	(0.0164)
Construction Year[2)]			
Before 1988	−0.0054	0.0004	0.0003
	(0.0285)	(0.0285)	(0.0285)
1989 - 2000	0.0653***	0.0647***	0.0647***
	(0.0172)	(0.0171)	(0.0171)
After 2011	−0.2528***	−0.2410***	−0.2411***
	(0.0493)	(0.0492)	(0.0493)
Corridor Type[3)]			
Corridor Type	−0.0697**	−0.0873**	−0.0874**
	(0.0265)	(0.0270)	(0.0271)
Mixed Type	−0.0308+	−0.0334+	−0.0335+
	(0.0184)	(0.0183)	(0.0184)
Avg Household Area	0.0020***	0.0018***	0.0018***
	(0.0004)	(0.0004)	(0.0004)
Log Price per Unit	0.0130	0.0188	0.0188
	(0.0176)	(0.0176)	(0.0176)
Population Age			
Elder Population Ratio	0.9051***	0.8464***	0.8460***
	(0.2226)	(0.2221)	(0.2223)
Youth Population Ratio	0.0878	0.0494	0.0502
	(0.2732)	(0.2755)	(0.2760)
cons	3.6065***	3.2784***	3.2793***
	(0.1147)	(0.1398)	(0.1408)
N	1949	1949	1949
R^2	0.1126	0.1210	0.1210
F-value	17.53	16.62	15.63

+p<0.1 *p<0.05 **p<0.01 ***p<0.001

1) : Reference group is individual heating
2) : Reference group is constructed between 2001 and 2010
3) : Reference group is stair type

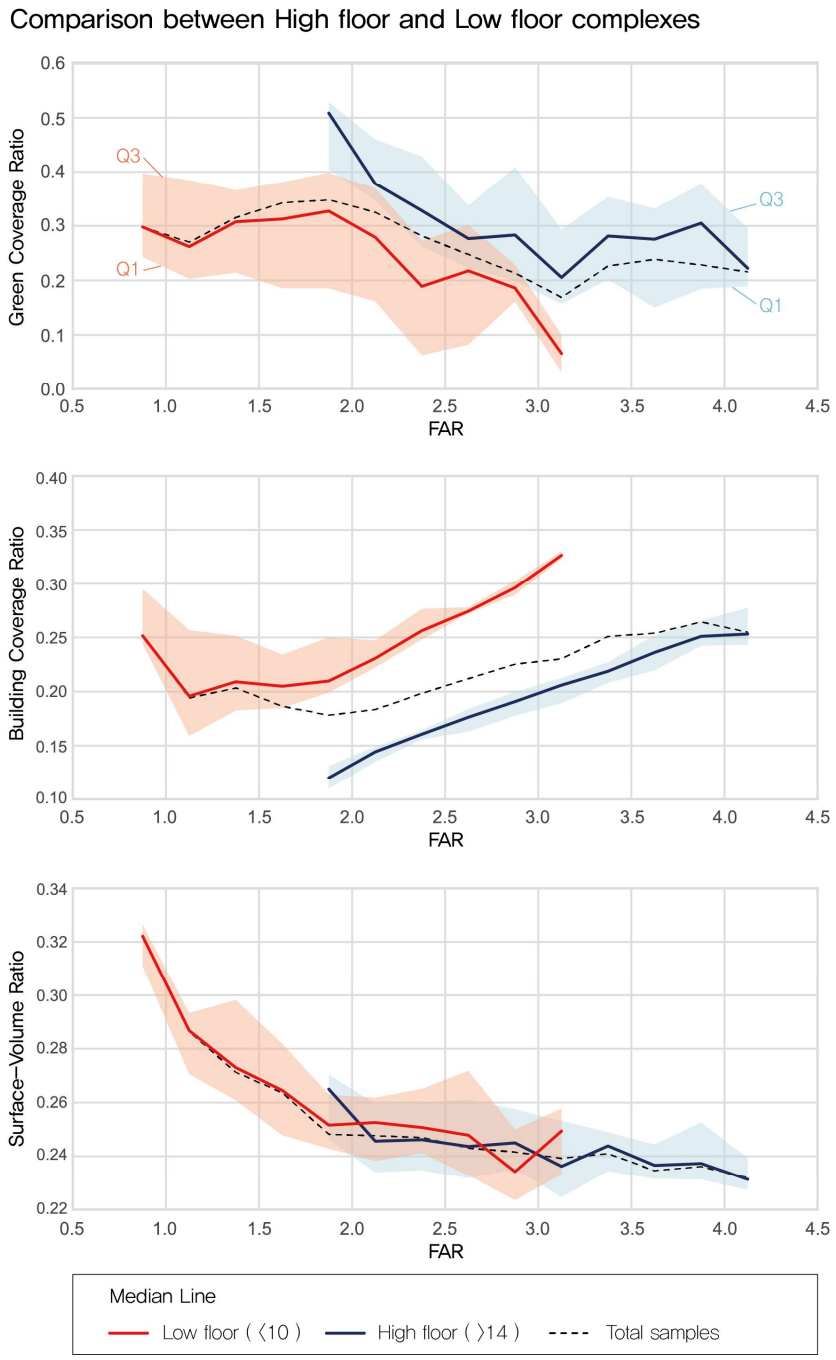
3절 고층 및 저층 고밀화 비교 분석 결과

고층 고밀화와 저층 고밀화의 차이를 분석하기 위하여 고층 단지(평균 14층 이상)와 저층 단지(10층 이하) 간 형태적 차이를 비교하였다. 전체 아파트 단지를 대상으로 건폐율, 단지 내부 녹지율, 표면비(Surface-Volume Ratio)를 계산하여 밀도 별 중간값을 나타낸 결과는 다음과 같다(그림 13).

먼저 전체적으로 아파트 단지가 고밀화될수록 녹지는 감소하나, 고층 단지는 저층 단지에 비해 단지 내부 녹지의 비율이 높고 천천히 감소한다. 저층, 고층 단지 모두 용적률 200~300% 구간에서 녹지가 급격히 감소한다. 그런데도 이 구간에서 고층 단지는 저층 단지에 비해 녹지 비율이 약 10% 높다. 고층 단지는 이후 더 높은 용적률에서도 녹지율 20% 이상으로 안정적으로 유지되었다. 이는 고층 단지가 저층 단지에 비해 폭염 기간 냉각에 유리한 이점을 제공한다.

다음으로 전체적으로 아파트 단지가 고밀화될수록 건폐율은 증가하는 경향이 있다. 또한, 저층 단지는 고층 단지에 비해 건폐율이 더 높은 값에서 급격히 증가한다. 용적률 300%에서 저층 단지는 건폐율이 약 32%, 고층 단지는 건폐율이 약 19%이다. 이는 저층 단지는 높은 용적에서 같은 바닥면적을 확보하기 위해 더 높은 건물 면적이 필요하기 때문이다.

마지막으로 표면비의 경우, 전체적으로 감소하는 경향을 보인다. 저층 단지는 고밀화되면서 표면비가 0.32에서 0.24까지 감소하며, 고층 단지는 0.26에서 0.24까지 감소하였다. 그러나 두 그룹이 겹치는 용적률 200~300% 구간에서 저층 단지와 고층 단지 간 차이는 없었다.



[그림 13] 고층 단지와 저층 단지의 녹지율, 건폐율, 표면비 변화

4절 샘플 분석 결과

1. 밀도 및 층수에 따른 단지 배치 분석

단지 고밀화와 평균 층수에 따라 배치 특성이 어떻게 달라지는지 분석하기 위하여 고층 단지(14층 이상)와 저층 단지(10층 이하)를 밀도 별로 추출하였다. 밀도 및 층수의 범위를 설정하여 총 5개의 그룹을 추출하였다(표 4)

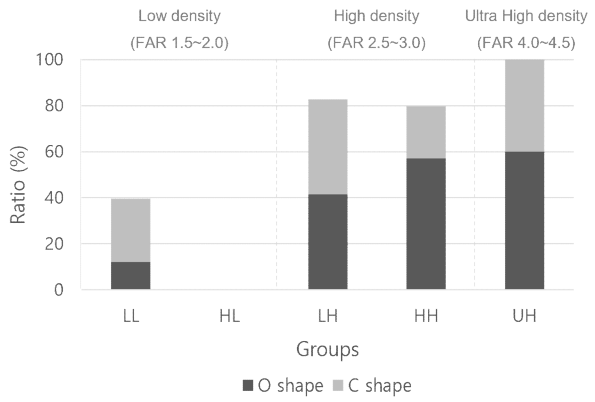
먼저 각 그룹의 아파트 단지에 ‘ㄷ, ‘ㅁ’ 자 형태로 건축물이 외부 공간을 둘러싸는 위요형 배치가 있는지 파악하였다. 저밀한 단지는 위요형 배치를 가진 단지의 비율이 낮았으며, 대부분 판상형이나 타워형 아파트가 나열된 형태였다. 고밀한 단지 그룹일수록 위요형 배치를 가진 비율이 높아졌다. 고밀 그룹(HH, LH)에서는 층수에 상관없이 모두 약 80% 위요형 배치를 가졌으며, 특히 가장 고밀한 그룹(UH)에서는 모든 단지가 위요형 배치를 가졌다(그림 14). 이러한 폐쇄적인 형태는 Sky View Factor가 매우 낮은 경향이 있다(그림 16). 고밀한 단지일수록 건축년도 또한 1992년~2000년에 몰려있는 경향이 있는데, 이러한 고밀 위요형 단지들이 용적률, 인동 간격 등 규제가 약했던 90년대 중・후반에 건축되었음을 알 수 있다(그림 15). 단 판상 및 타워형의 주동 형태 차이에서는 표 (5)와 같이 큰 차이가 없었다.

[표 4] 밀도 및 층수 범위별 아파트 단지 그룹 추출

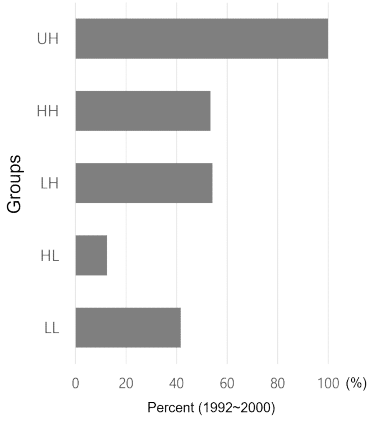
그룹명	코드	용적률 범위	평균 층수 범위	총 단지 수
고층 초고밀 (Ultra high)	UH	400~450%	14층 이상	10
고층 고밀 (High-high)	HH	250~300%	14층 이상	93
저층 고밀 (Low-high)	LH	250~300%	10층 이하	29
고층 저밀 (High-low)	HL	150~200%	14층 이상	8
저층 저밀 (Low-low)	LL	150~200%	10층 이하	174

[표 5] 단지 그룹별 판상 및 타워형 비율

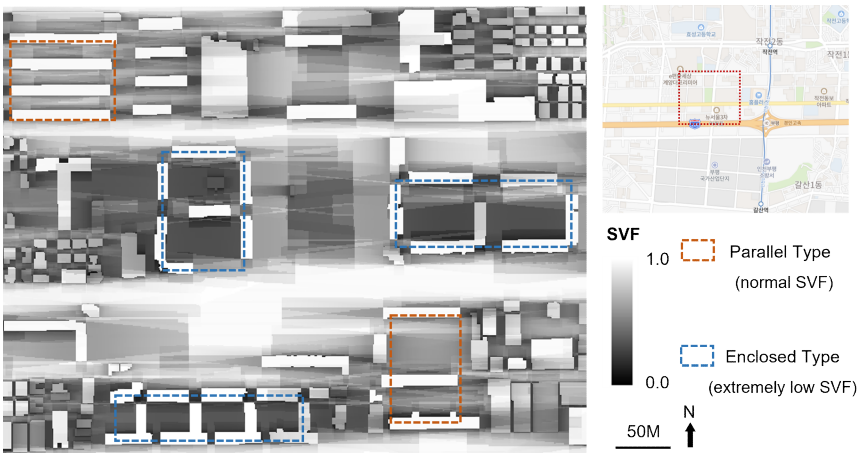
그룹명	코드	판상형	판상·타워 혼합	타워형
고층 초고밀 (Ultra high)	UH	8(80%)	2(20%)	0
고층 고밀 (High-high)	HH	73(78.5%)	19(20.4%)	1(1.1%)
저층 고밀 (Low-high)	LH	24(82.8%)	5(17.2%)	0
고층 저밀 (High-low)	HL	6(75%)	2(25%)	0
저층 저밀 (Low-low)	LL	132(75.9%)	38(21.8%)	4(2.3%)



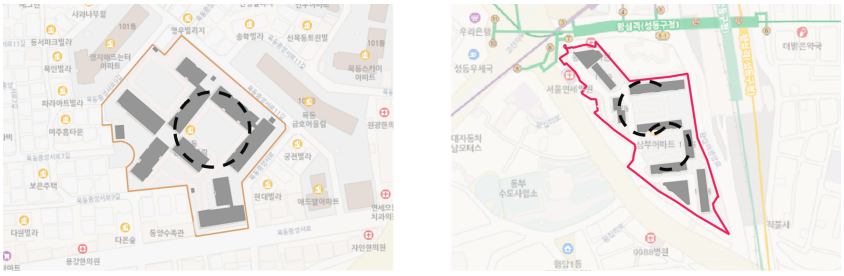
[그림 14] 그룹에 따른 위요형 배치 비율



[그림 15] 92-2000년 건축 비율



[그림 16] 배치 형태에 따른 Sky View Factor 차이



O shape enclosed　　C shape enclosed

[그림 17] ‘ㅁ’자 및 ‘ㄷ’자 위요형 배치 단지 예시

2. 밀도 및 층수에 따른 인동 간격 분석

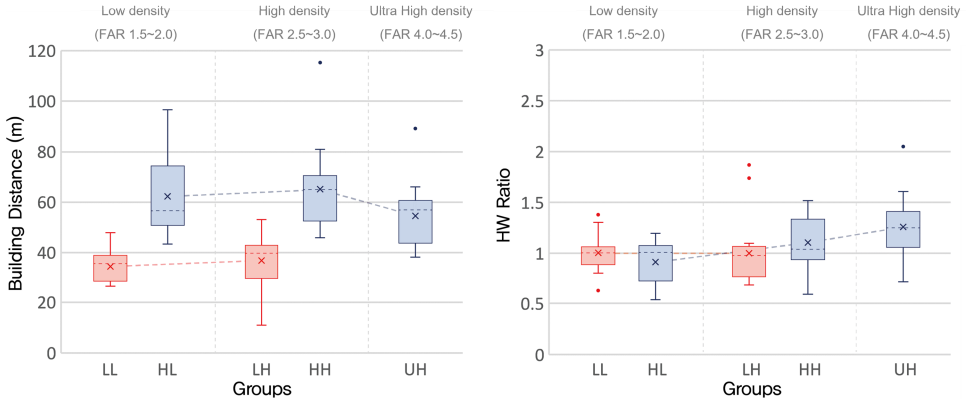
단지 고밀화와 평균 층수에 따라 인동 간격과 HW비율이 어떻게 달라지는지 분석하기 위해 각 그룹에서 5개 단지를 랜덤으로 추출하였다. 샘플은 수도권 곳곳에 고루 분포하며(그림 18), 샘플 단지에서 두 동이 평행하게 마주 보는 지점에서 간격과 HW 비율을 측정하였다. 측점 지점의 수는 표 (6)과 같다.

[그림 18] 그룹별 샘플 단지의 위치

[표 6] 샘플 분석 그룹별 단지 및 측점 지점 수

그룹명	LL	HL	LH	HH	UH
샘플 단지 수	5	5	5	5	5
측점 지점 수	20	9	20	17	19

그룹별 차이를 분석한 결과(그림 19) 먼저 고층 단지는 저층 단지에 비해 인동 간격이 넓은 경향을 보인다. 이는 절대적인 간격이 아닌 건물 높이와의 비례로 거리를 제한하는 인동 간격 규제 때문이다. 다음으로 평균 층수에 상관없이 밀도가 높은 그룹에서 HW비가 커지는 경향을 보였다.



[그림 19] 밀도, 층수에 따른 인동 간격 및 HW비 변화

제5장 해석 및 고찰

1절 결과 해석 및 고찰

1. 단지 고밀화와 폭염 기간 냉방 취약성

본 연구에선 폭염 기간 공동주택에서 냉방 에너지가 큰 폭으로 증가하며, 고밀화될수록 냉방 수요가 큰 비율로 증가한다는 사실을 발견하였다. 결과적으로 고밀단지들이 더욱 취약해질 수 있으며, 이는 고밀화에 따라 더욱 강한 열섬효과가 발생하고 폭염 기간 증폭되기 때문으로 추정된다. 고밀화된 단지에서 열섬효과가 심한 이유는 저밀 단지에 비해 더 많은 가구에서 폐열이 방출되며, 녹지가 적고 더 많은 인공물들이 열을 흡수하기 때문이다.

특히 한국 수도권의 고밀 아파트는 ‘ㅁ’자 혹은 ‘ㄷ’자로 위요된 형태가 다수를 차지한다. 이러한 아파트 단지들은 상대적으로 용적률 규제가 완화된 1990년대 말~2000년대 초에 지어졌으며, 이 시기 인동 간격 규제 역시 약했기 때문에 HW 비율이 높은 단지들이 많다. 이러한 특성들로 인해 폭염 기간 냉방 효율이 악화될 수 있다. 먼저 중정이 건물로 차폐된 경우 통풍에 불리하며, 낮은 Sky-view factor로 인해 열 포집이 발생할 수 있다. Kim et al.(2022)은 Sky-view factor가 극단적으로 낮은 이러한 아파트 단지들이 충분한 그늘에도 불구하고 이러한 효과로 표면온도가 오히려 높아질 수 있다는 근거를 제시하였다. 이러한 효과들은 폭염 기간 냉방에서도 악영향을 미칠 것으로 예상된다. HW비율이 높은 경우에도 야간의 장파 복사를 방해하며 원활한 열 방출이 이루어지지 않아 열섬효과가 강해진다.

단지가 고밀화될 경우, 표면비가 감소하는 경향이 있다. 표면비가 감소할 경우 외부 대기에서의 열 유입이 적어지고 냉방 효율이 올라갈 것으로 기대하였으나, 본 연구에서는 반대로 떨어지는 결과가 나타났다. 결과적으로 서울 수도권에서 표면비와 냉방 간 상관관계가 적거나 없다는 연구(Oh et al., 2021)와

맥을 같이한다. 따라서 서울 수도권 기후에서는 폭염 기간 고밀화로 인한 표면비 감소, 그늘효과의 이점보다는 열섬효과 악화로 인한 부작용이 더욱 크다고 할 수 있다.

2. 고층 및 저층 고밀화의 취약성 차이

본 연구에서는 고층 단지와 저층 단지를 분리하여 고밀화 시 냉방 취약성에 차이가 있는지 살펴보았다. 결과적으로 저층 단지가 고밀화될 경우 고층 단지에 비해 더욱 가파르게 취약해지는 경향이 있었다. 이러한 이유로 먼저 고층 대기의 특성을 살펴볼 필요가 있다. 이상적인 지표면에서 고층은 저층에 비해 풍속이 빠르며 주간에는 온도가 더욱 낮다. 이러한 경향성은 통상적인 아파트 높이인 100M~200M 권역까지 발생한다(Oke, 2002). 이는 고층 아파트가 더 시원한 대기를 접하며 바람을 통해 열을 빨리 식힐 가능성이 있음을 시사한다. 게다가 고층 단지의 경우 저층 단지에 비해 인동 간격이 넓었으며, 이는 통풍에 더욱 유리한 조건을 제공할 수 있다.

고층 단지는 저층 단지에 비해 폭염을 저감시킬 수 있는 단지 내 녹지 비율이 높고, 고밀화되어도 크게 줄어들지 않는다. 이는 고층 고밀화가 오픈스페이스를 줄이는 대신 층수를 높이는 방향으로 일어나기 때문이다. 같은 밀도에서 건폐율 역시 고층 단지가 작은데, 이는 옥상 면적이 상대적으로 적음을 의미한다. 폭염 기간에는 옥상 표면 온도가 월등히 높으며(Hadavi & Pasdarshahri, 2021), 이는 최상층 가구의 냉방 효율을 악화시킬 수 있다. 건폐율이 높은 저층 단지는 고층 단지에 비해 옥상의 열기에 노출되는 최상층 단지가 많다. 시뮬레이션 결과에서도 같은 용적률에서 고층 단지는 저층 단지에 비해 평균 표면온도가 낮다는 관련 연구 결과 역시 존재한다(정숙진・윤성환, 2015; Chen et al., 2020). 이 역시 옥상 면적과 열 손실률의 차이로 해석된다. 따라서 같은 밀도라도 층수가 높아 건폐율이 낮으면 폭염 기간 냉방에 덜 취약한 것으로 해석된다.

3. 폭염 저감 대책의 냉방 취약성 완화 효과

회귀 분석 결과 근린 녹지가 많을수록, 건축년도가 최신인 그룹일수록 폭염 기간 냉방에 덜 취약했다. 건축물의 단열 성능 향상과 녹지 조성은 대표적인 폭염 저감 대책으로, 냉방 에너지를 절감하는 효과가 있다(Viguié et al., 2020). 본 연구에서도 이러한 대책의 효과를 다시 한번 살펴볼 수 있었으며 특히 녹지는 큰 규모에서 더 강한 냉각 효과가 발생하므로(Wong et al., 2021) 단지 외부에 이를 형성하는 것이 효과적일 것으로 기대된다.

그러나 88년 이전에 지어진 단지들은 건축 당시 취약한 단열에도 불구하고 90년대 단지들에 비해 냉방 에너지가 덜 급증하였다. 이러한 이유는 한국의 초기 아파트 단지들은 통풍이 원활한 판상 평행형인 경우가 많고(이상진・박소현, 2019), 주차장 면적이 작아 녹지가 풍부하기 때문이다. 최근 노후 아파트의 경우 단열, 창호 리모델링 사업이 이루어지고 있으며, 그린 리모델링 민간이자 지원사업 등 공공 지원도 활발한 원인도 고려해볼 수 있다. 따라서 리모델링 사업을 통해 폭염 기간 취약한 단지들의 냉방 에너지를 절감할 것으로 기대된다.

2절 연구 의의 및 한계점

1. 연구 의의 및 시사점

먼저 본 연구는 실제 관측된 전기 사용량 데이터를 기반으로 폭염 기간 고밀한 주거단지가 냉방에 더욱 취약하다는 가설을 규명하였다. 더 나아가 고층 형태와 저층 형태 중 어떤 유형이 고밀화 시 폭염 기간 더욱 취약해지는지 살펴보았다. 고층 고밀화가 덜 취약함을 새로 발견하였으며, 이와 같은 결과들을 건물 배치, 단지 조경, 대기 순환, 시대적 배경 등 다양한 각도에서 해석하였다. 추가로 기존 연구에서도 폭염을 완화하기 위해 제시된 녹지 확충, 건축물 단열 정책이 냉방 에너지 급증을 막는데 효과적임을 밝혔다.

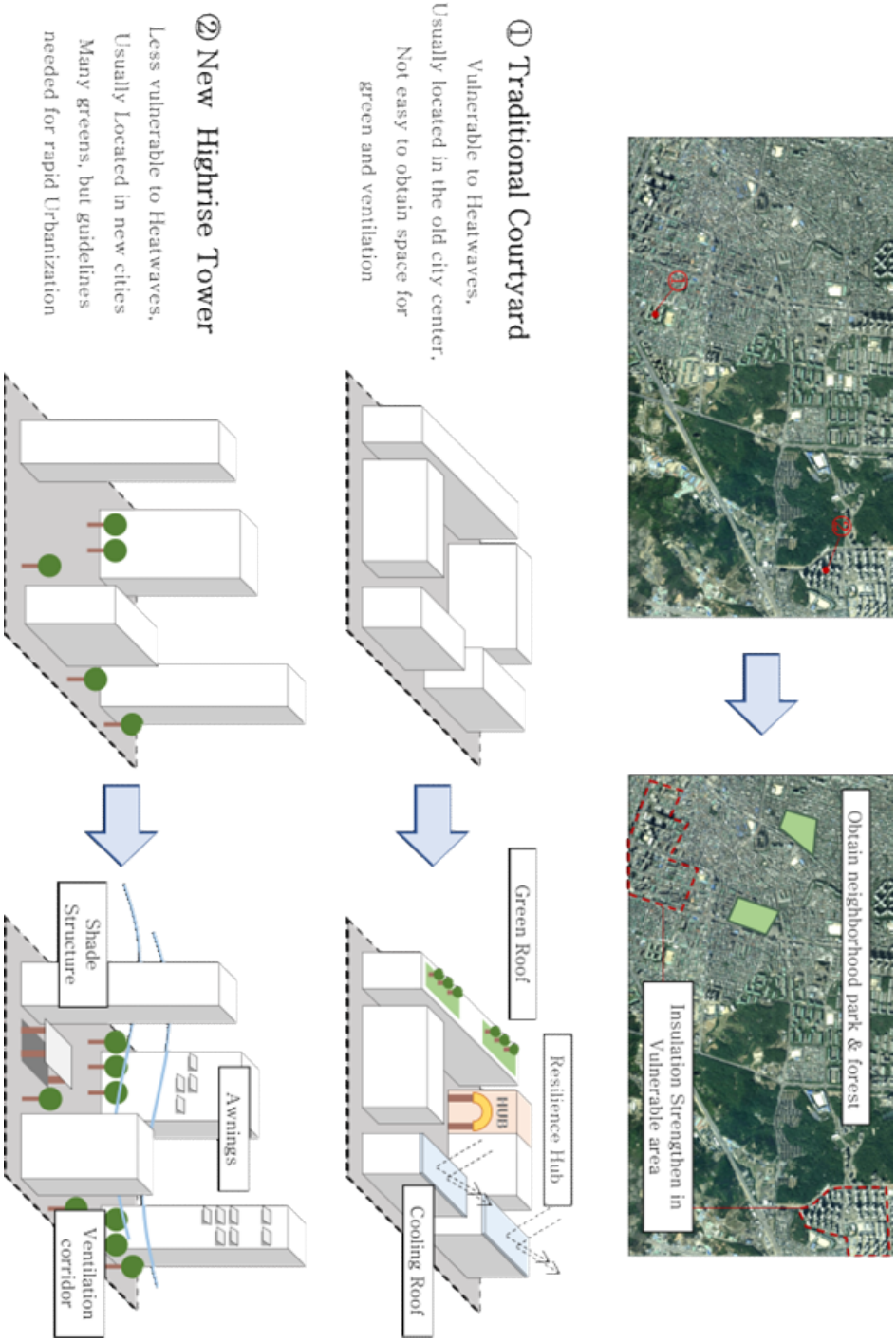
연구 결과를 바탕으로 도시계획에서 폭염이라는 이상기후에 대응하는 고밀도시 정책을 제언할 수 있다(그림 20). 먼저 전통적인 도심의 중정형 저층 고밀 지구는 폭염 기간 냉방에 더욱 취약할 수 있다. 이와 같은 지역들은 지가와 소유권 문제로 녹지 및 통경축 확보가 어려우며 높은 건폐율로 옥상의 열기가 전달되기 쉽다. 따라서 옥상 녹화를 적극 고려해볼 수 있으며 하중이 문제일 경우 이끼, 쿨루프 등을 설치할 수 있다. 노후화된 단지에선 노년층 비율이 높은 만큼[9] 충분한 냉방을 제공할 수 있는 Resilience Hub(Keith & Meerow, 2022)를 집중적으로 설치하여 폭염 시 주민들이 대피할 수 있도록 할 수 있다.

주로 신축이나 신도시에서 볼 수 있는 타워형 고층 고밀 지구는 녹지 확보 및 통풍에 유리하다. 폭염 기간 열섬효과에는 상대적으로 강할 수 있으나, 중정형 저층 단지에 비해 그늘이 적어 외부 열 환경이 악화할 수 있다(Natanian & Auer, 2020). 따라서 폭염 기간 외부 그늘막 설치, 어닝 및 처마 설치 등이 더욱 효과적일 것이다.

9) 부록 1. 건축년도에 따른 주민 연령대 분포 특성 참고

폭염 위험도가 높은 지역에서 신도시를 계획할 때 공개공지, 보행로 등을 이용해 통경축을 확보하고 건축물로 오픈스페이스가 과도하게 위요되지 않는 단지 배치를 고민해볼 수 있다. 특히 폭염이 취약한 저소득층, 노년층을 위해 주거단지를 계획할 경우 도시공원 인근에 부지를 선정하고, 폐쇄적인 저층형 단지를 지양할 수 있다. 고밀도로 계획되는 중심지의 경우 건물 사이 여유 공간을 충분히 확보하며 단열 강화 지구를 지정하여 냉방 효율을 높일 수 있다. 이러한 지역들이 빠른 도시화가 진행되는 아시아, 아프리카 지역인 만큼 적절한 고밀화 방식을 제안하는 의의가 있다.

공중보건 측면에서도 본 연구 결과는 의의가 있다. 먼저 공동주택 거주민의 열 스트레스를 줄이는 것은 관절염 예방 등 건강을 증진한다(Tonn et al., 2023). 따라서 저층 고밀하고 폐쇄적이며 노후화된 공동주택 거주민의 경우 온열질환 등 건강상 문제가 발생한다면 개방적이고 녹지가 많은 주거단지로의 이주를 권고하거나 지원할 수 있다. 폭염에 취약한 단지들에 단열 및 창호 리모델링을 지원하는 것 역시 거주민의 적응력을 높이고 건강을 증진하는 방안이다.



[그림 20] 연구 결과를 바탕으로 한 폭염 저감 대책 제안

2. 연구의 한계점

본 연구에서는 냉방에 있어 고밀화의 이점을 제공하는 그늘의 양을 측정하지 않았다. 그늘효과 역시 태양 복사를 차단하여 냉방에 이점을 제공할 수 있는 만큼 향후 연구에서는 그늘의 양과 폭염 기간 냉방 취약성의 관계에 대해서 살펴볼 필요가 있다. 현재 분석한 밀도와 평균 층수 외에도 건축물 특성에 대한 변수를 추가로 포함할 수 있다. 먼저 단지의 향에 따라 냉방 에너지 소비가 달라질 수 있다. 건물 형태의 다양성 역시 표면 온도와 열섬효과에 영향을 미칠 수 있는 만큼 (Liao et al., 2021) 향후 연구에서는 단지의 향, 층수 및 주동 형태의 다양성을 변수에 포함할 수 있다.

연구 해석 부분에서 고밀단지가 폐쇄적이라 폭염 기간 취약하며, 고층 고밀단지가 통풍에 상대적으로 우수할 것이라는 가설을 제시하였다. 향후 연구에서는 이를 바람길 시뮬레이션 등을 통해 검증할 필요가 있다. 또한, 이러한 요인들이 실제 냉방 에너지의 증감으로 이어지는지 건물 에너지 시뮬레이션 등을 통해 확인할 것을 제안한다.

마지막으로 본 연구는 기후대의 한계점이 존재한다. 서울은 여름철에 덥고 습한(hot-humid) 기후를 가진다. 이러한 환경은 덥고 건조한(hot-arid) 환경에 비해 건물 그늘로 인한 대기 및 체감온도 감소가 적으며(Rahman et al., 2021), 열섬효과로 인한 건물 에너지 변화 폭은 더욱 크다(Singh & Sharston, 2022). 따라서 그늘의 영향이 크고 열섬효과의 영향이 적은 덥고 건조한 지역에서도 본 연구 결과가 유효한지 검증하는 추가적인 연구가 필요하다.

제6장 결론

본 연구에서는 먼저 고밀화된 도시가 폭염 기간 냉방에 취약하다는 결론을 도출하였다. 특히 1990년대 말 지어진 중정 고밀의 폐쇄적 형태는 더 강력한 열섬효과를 겪어 냉방에 취약할 수 있다. 또한, 저층 고밀화 지역이 고층 고밀화 지역에 비해 옥상 면적이 넓고 녹지가 적기 때문에 폭염 기간 더 취약해질 수 있음을 제안하였다. 이와 더불어 인근 녹지 확충, 단열 성능 향상과 같은 폭염 저감 대책이 효과가 있음을 발견하였다.

기존 연구들에서는 다양한 폭염 저감 대책과 이에 대한 효과들을 제시하였다. 본 연구에서는 연구 결과를 바탕으로 어떠한 지역에 폭염 저감 대책이 집중되어야 하는지, 각 지역의 특색에 맞는 대책은 무엇인지 더욱 세부적으로 제안하였다. 고밀도시에서도 폭염을 예방하기 위해 차별적인 대책이 필요함을 시사한다. 이러한 조치는 폭염 기간 고밀 도시의 취약성을 완화하며, 회복탄력성을 강화할 것이다.

앞으로 기후 변화로 인해 폭염과 같은 이상 기후는 더욱 빈번해질 것이다. 이에 따라 점차 일반적인 상황이 아닌 이상 기후 차원에서 기존 도시계획의 방향성을 재검토할 필요성이 커지고 있다. 본 연구는 이러한 시대적 흐름에 맞추어 도시계획의 기후 변화 대응에 조금이나마 기여하고자 하였다. 또한 향후에도 이러한 논의가 지속될 것으로 기대된다.

참고문헌

[국내 문헌]

(1) 단행본

- 맹다미, 장남종, 백세나 (2017). 『서울시 저층주거지 실태와 개선 방향』. 서울: 서울연구원.
- 서울시정개발연구원 (2003).『지표로 본 서울변천 2003』. 서울:서울연구원

(2) 연구논문

- 음미령, 홍원화, 이지애 (2018). 공동주택 에너지 사용량 평가 개선을 위한 에너지 사용량 영향 요인 도출. 『대한건축학회 논문집-구조계』, 34(7), 27-34.
- 이상진, 박소현 (2019). 부산 아파트 단지 배치형태 변화의 요인과 과정에 관한 연구. 『대한건축학회 논문집-계획계』, 35(3), 91-102.
- 정숙진, 윤성환 (2015). 판상형 공동주택의 건폐율 및 용적률이 일조・옥외열환경에 미치는 영향 분석. 『대한건축학회 논문집-계획계』, 31(5), 69-76.

(3) 보고서

- 2012년 기상청 한반도 기후변화 전망보고서

(4) 홈페이지

- 서울특별시 역세권 활성화사업 운영 기준,

https://news.seoul.go.kr/citybuild/archives/513273 (2022. 11. 30.)

- 그린 리모델링 창조 센터,

https://www.greenremodeling.or.kr/ (2022. 12. 29.)

[국외 문헌]

(1) 단행본

- Oke, T. R. (2002). Boundary layer climates. Routledge.

(2) 연구논문

- Ca, V. T., Asaeda, T., & Abu, E. M. (1998). Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park. Energy and Buildings, 29(1), 83-92.
- Chen, J., Wang, X., & Steemers, K. (2013). A statistical analysis of a residential energy consumption survey study in Hangzhou, China. Energy and Buildings, 66, 193-202.
- Chen, Y., Wu, J., Yu, K., & Wang, D. (2020). Evaluating the impact of the building density and height on the block surface temperature. Building and Environment, 168, 106493.
- Cortina, J. M. (1993). Interaction, nonlinearity, and multicollinearity: Implications for multiple regression. Journal of management, 19(4), 915-922.
- Davis, L. W., & Gertler, P. J. (2015). Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(19), 5962-5967.
- De Cian, E., Pavanello, F., Randazzo, T., Mistry, M. N., & Davide, M. (2019). Households' adaptation in a warming climate. Air conditioning and thermal insulation choices. Environmental Science & Policy, 100, 136-157.
- Fertner, C., & GROßE, J. (2016). Compact and resource efficient cities? Synergies and trade-offs in European cities. European Spatial Research and Policy, 23(1), 65-79.

- Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). Scientific reports, 7(1), 1-11.
- Giridharan, R., Ganesan, S., & Lau, S. (2004). Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. Energy and Buildings, 36(6), 525-534.
- Godoy-Shimizu, D., Steadman, P., & Evans, S. (2021). Density and morphology: from the building scale to the city scale. Buildings & Cities, 2(1), 92-113.
- 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.
- Hadavi, M., & Pasdarshahri, H. (2021). Investigating effects of urban configuration and density on urban climate and building systems energy consumption. Journal of Building Engineering, 44, 102710.
- Hu, S., Yan, D., Dong, B., & Fu, J. (2020). Exploring key factors impacting cooling usage patterns of Chinese urban household based on a large-scale questionnaire survey. Energy and Buildings, 214, 109885.
- Keith, L., & Meerow, S. (2022). Planning for Urban Heat Resilience. PAS Report 600.
- Kim, J., Lee, D.-K., Brown, R. D., Kim, S., Kim, J.-H., & Sung, S. (2022). The effect of extremely low sky view factor on land surface temperatures in urban residential areas. Sustainable Cities and Society, 80, 103799.
- Kim, K., Yi, C., & Lee, S. (2019). Impact of urban characteristics on cooling energy consumption before and after construction of an urban park: The case of Gyeongui line forest in Seoul. Energy and Buildings, 191, 42-51.

- Ko, Y., & Radke, J. D. (2014). The effect of urban form and residential cooling energy use in Sacramento, California. Environment and planning B: Planning and Design, 41(4), 573-593.
- Krehl, A., Siedentop, S., Taubenböck, H., & Wurm, M. (2016). A comprehensive view on urban spatial structure: Urban density patterns of German city regions. ISPRS International Journal of Geo-Information, 5(6), 76.
- Li, C., Song, Y., & Kaza, N. (2018). Urban form and household electricity consumption: A multilevel study. Energy and Buildings, 158, 181-193.
- Li, Q., Quan, S. J., Augenbroe, G., Yang, P. P.-J., & Brown, J. (2015). Building energy modelling at urban scale: Integration of reduced order energy model with geographical information. Building Simulation,
- Liao, W., Hong, T., & Heo, Y. (2021). The effect of spatial heterogeneity in urban morphology on surface urban heat islands. Energy and Buildings, 244, 111027.
- Natanian, J., & Auer, T. (2020). Beyond nearly zero energy urban design: A holistic microclimatic energy and environmental quality evaluation workflow. Sustainable Cities and Society, 56, 102094.
- Newman, P. W., & Kenworthy, J. R. (1989). Gasoline consumption and cities: a comparison of US cities with a global survey. Journal of the American planning association, 55(1), 24-37.
- Oh, M., Jang, K. M., & Kim, Y. (2021). Empirical analysis of building energy consumption and urban form in a large city: A case of Seoul, South Korea. Energy and Buildings, 245, 111046.
- Oh, M., & Kim, Y. (2019). Identifying urban geometric types as energy performance patterns. Energy for Sustainable Development, 48, 115-129.

- Rahman, M. A., Dervishi, V., Moser-Reischl, A., Ludwig, F., Pretzsch, H., Rötzer, T., & Pauleit, S. (2021). Comparative analysis of shade and underlying surfaces on cooling effect. Urban forestry & urban greening, 63, 127223.
- Ratti, C., Baker, N., & Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. Energy and Buildings, 37(7), 762-776.
- Salvati, A., Coch, H., & Morganti, M. (2017). Effects of urban compactness on the building energy performance in Mediterranean climate. Energy Procedia, 122, 499-504.
- Singh, M., & Sharston, R. (2022). Quantifying the dualistic nature of urban heat Island effect (UHI) on building energy consumption. Energy and Buildings, 255, 111649.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900.
- Strømann-Andersen, J., & Sattrup, P. A. (2011). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. Energy and Buildings, 43(8).
- Su, M. A., Ngarambe, J., Santamouris, M., & Yun, G. Y. (2021). Empirical evidence on the impact of urban overheating on building cooling and heating energy consumption. Iscience, 24(5), 102495.
- Sun, Y., & Augenbroe, G. (2014). Urban heat island effect on energy application studies of office buildings. Energy and Buildings, 77, 171-179.
- Teller, J. (2021). Regulating urban densification: what factors should be used? Buildings & Cities, 2(1).
- Tereci, A., Ozkan, S. T. E., & Eicker, U. (2013). Energy benchmarking for residential buildings. Energy and Buildings, 60, 92-99.

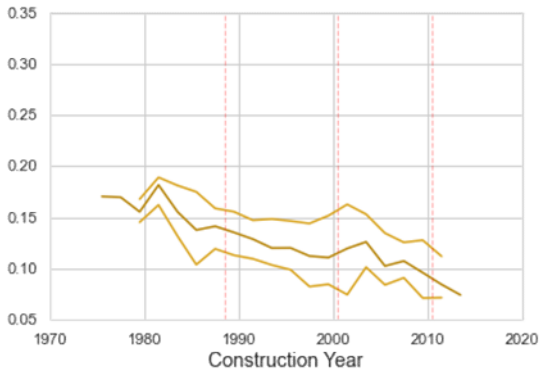
- Tonn, B., Hawkins, B., Rose, E., Marincic, M., Pigg, S., & Cowan, C. (2023). Saving lives by saving energy? Examining the health benefits of energy efficiency in multifamily buildings in the United States. Building and Environment, 228, 109716.
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. (2018). Impact of urban microclimate on summertime building cooling demand: A parametric analysis for Antwerp, Belgium. Applied Energy, 228, 852-872.
- van den Brom, P., Meijer, A., & Visscher, H. (2018). Performance gaps in energy consumption: household groups and building characteristics. Building Research & Information, 46(1), 54-70.
- Vartholomaios, A. (2017). A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city. Sustainable Cities and Society, 28, 135-145.
- Viguié, V., Lemonsu, A., Hallegatte, S., Beaulant, A.-L., Marchadier, C., Masson, V., Pigeon, G., & Salagnac, J.-L. (2020). Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris. Environmental Research Letters, 15(7), 075006.
- Wong, K. V., Paddon, A., & Jimenez, A. (2013). Review of world urban heat islands: Many linked to increased mortality. Journal of Energy Resources Technology, 135(2).
- Wong, N. H., Jusuf, S. K., Syafii, N. I., Chen, Y., Hajadi, N., Sathyanarayanan, H., & Manickavasagam, Y. V. (2011). Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption. Solar energy, 85(1), 57-71.
- Wong, N. H., Tan, C. L., Kolokotsa, D. D., & Takebayashi, H. (2021). Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. Nature Reviews Earth & Environment, 2(3), 166-181.

- Woo, Y.-E., & Cho, G.-H. (2018). Impact of the surrounding built environment on energy consumption in mixed-use building. Sustainability, 10(3), 832.
- You, Y., & Kim, S. (2018). Revealing the mechanism of urban morphology affecting residential energy efficiency in Seoul, Korea. Sustainable Cities and Society, 43, 176-190.
- Zhang, Y., Hu, S., Yan, D., Guo, S., & Li, P. (2021). Exploring cooling pattern of low-income households in urban China based on a large-scale questionnaire survey: A case study in Beijing. Energy and Buildings, 236, 110783.
- Zong, L., Liu, S., Yang, Y., Ren, G., Yu, M., Zhang, Y., & Li, Y. (2021). Synergistic influence of local climate zones and wind speeds on the urban heat island and heat waves in the megacity of Beijing, China. Frontiers in Earth Science, 9, 673786.

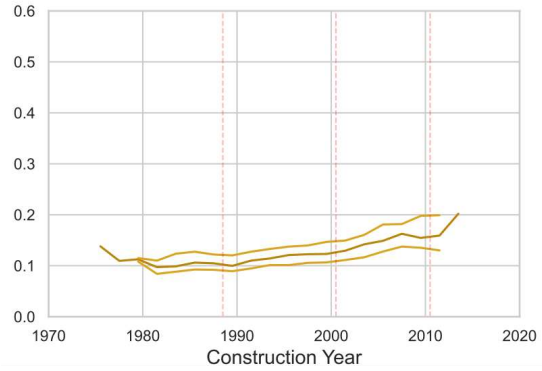
부록

본 부록은 연구 결과를 더욱 엄밀히 하고, 해석을 뒷받침할 수 있는 타당한 근거를 제시하고자 수록하였다.

1. 건축년도에 따른 주민 연령대 분포 특성



[그림 21] 건축년도에 따른 노년층 인구 비율 변화



[그림 22] 건축년도에 따른 유소년층 인구 비율 변화

먼저 데이터 셋의 아파트 단지(n=1949)들을 대상으로 건축년도에 따른 인구 비율 변화를 살펴본 결과, 오래된 아파트 단지일수록 노년층 비율이 높고 유소년층 비율이 낮아지는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 노후 아파트의 경우 장기 거주자가 많고, 이에 따라 연령대가 높아지는 경향이 있기 때문으로 해석된다.

2. 지역에 따른 단지 특성 차이

본 연구 결과가 지역적 차이에서 기인하는지 알아보고자 지역별 평균 에너지 증가율, 밀도, 근린 녹지 비율, 건축년도를 비교하였다(표 7). 비교 결과 용적률과 근린 녹지 비율은 지역별로 어느 정도 차이가 있었다. 서울과 인천, 수원 등 대도시 권역에서는 용적률이 높고 근린 녹지 비율이 낮았으며, 위성도시는 반대로 용적률이 낮고 녹지 비율이 높았다. 또한, 경기 남부로 갈수록 근린 녹지의 비율이 높았다.

다만 냉방 증가율은 연구 결과의 경향성과 전반적으로 일치하지 않음을 알 수 있다. 예를 들어 인천 및 수원지역의 경우 용적률이 높고 녹지 비율이 가장 낮았지만 냉방 증가율 역시 가장 낮았다. 따라서 본 연구의 결과가 지역적 단위의 경향성이 아닌 개별 아파트 단지 단위에서의 경향성이며, 어떤 지역에서든지 고밀하고 근린 녹지가 적은 단지는 폭염 기간 냉방이 더욱 증가하는 경향이 있다,

[표 7] 지역별 평균값 차이 비교

지역 분류	냉방 증가율	용적률	근린 녹지 비율	건축년도 (중간값)	샘플 수
서울	70.63 %	2.604	0.243	1997	668
대도시 (인천, 수원)	65.26 %	2.398	0.238	1998	389
위성도시 (북부)[1]	70.45 %	2.215	0.284	1996	219
위성도시 (중부)[2]	70.41 %	2.245	0.292	1995	301
위성도시 (남부)[3]	67.20 %	2.115	0.357	2001	371

[1] 북부 : 경기도 고양시, 김포시, 구리시
[2] 중부 : 경기도 부천시, 광명시, 안양시, 과천시, 성남시, 하남시
[3] 남부 : 경기도 시흥시, 안산시, 군포시, 의왕시, 용인시(수지구, 기흥구)

3. 회귀모형의 적합성

회귀분석의 경우 두 개 이상의 독립변수가 서로 상관관계가 높은 다중공선성 문제가 발생할 수 있으며 특히 단지 밀도와 층수는 높은 상관관계를 가진다. 회귀 모형이 적합한지 검증하고자 VIF 분석을 진행하였으며, 결과는 표(8)과 같다.

[표 8] VIF 분석 결과

Independent Variables	VIF
Floor Area Ratio	2.343
Average Floor	1.960
Green Coverage Ratio	1.574
Altitude	1.596
Heating Type	
Central Heating	1.170
Regional Heating	1.492
Construction Year	
Before 1988	1.701
1989 - 2000	1.651
After 2011	1.065
Corridor Type	
Corridor Type	1.660
Mixed Type	1.385
Avg Household Area	1.650
Log Price per Unit	1.304
Population Age	
Elder Population Ratio	1.947
Youth Population Ratio	2.086

VIF 분석 결과 VIF 값이 5를 넘는 변수가 없었으며, 따라서 다중공선성으로 인해 회귀모형의 적합성에 문제가 있다고 보기 힘들다.

Abstract

Urban Densification Type Affects Cooling Energy Vulnerability in Heatwaves:

An Empirical Study in Seoul Metropolitan Area

Junhyeck Choi

Seoul National University

Graduate School of Environmental Studies

Climate change increases extreme weather events and threatens the stability of cities. Among them, heatwave causes heat stroke and can lead to residents' death. Cooling energy demand also dramatically increases. Therefore improving the thermal environment during heatwaves is necessary to decrease energy demand. It can maintain normal city functions during the abnormal high-temperature situation.

In this study, I explored which urban form factor affects vulnerability in heatwave periods, especially the density perspective. It has been discussed that dense cities have economic feasibility and sustainability advantages. Additional discussion on cooling energy is needed because dense cities experience more substantial heat island effects, which increase cooling energy consumption.

I defined urban density in the literature review and identified the

relationship between building cooling energy. Then, cooling energy factors are widely investigated, including the urban and surrounding environment. These processes identified urban density as floor area ratio(FAR). It can be decomposed into vertical density(average floor) and horizontal density(building-to-coverage ratio, BCR). The relation between urban density and cooling energy is determined by the interaction of several effects, such as urban heat island effect, shading effect, and heat inflow according to the surface-volume ratio. There is much evidence that the heat island effect increases the cooling energy demand. Additional research about which densification type: high-rise densification versus low-rise densification, can mitigate urban heat has yet to be conducted.

I tried to empirically confirm whether dense city areas have a higher cooling increasing rate during heat waves. 1,949 apartment complexes in the Seoul metropolitan area were selected. Based on collected data, cooling energy increasing rate(during heatwave year compared to standard years), FAR, and an average number of floors were calculated. Other control variables were defined and quantitatively calculated based on the literature review. The correlation between FAR and the cooing energy increasing rate was verified through a multiple linear regression model. The difference according to the average floors was verified with an interaction term. As a result, positive correlations and interactions were confirmed. Low-rise apartment complexes become more vulnerable when densified than high-rise apartment complexes.

I compared changes in green space ratio, complex layout, and building gaps according to densification. It identifies the cause of the high increase in cooling energy in high-density apartment complexes. First, when complexes

were densified, the green area ratio decreased. In high-density complexes, the HW ratio was low, and many surrounded ‘O’ or ‘C’ shape layout were observed. In the late 1990s, regulations about FAR and building gaps was weak, and many plate-shaped apartments with surrounded layout were built. This form is favorable for densification. In this layout, Sky-view Factor is extremely low; therefore, heat-trapping and long-wave radiation interference occur. Thus, high-density complexes are vulnerable during heatwaves due to the stronger urban heat island effect occurring by enclosed form and few green spaces.

A comparison between high-rise and low-rise complexes says that high-rise complexes have more green space. BCR increases slowly in high-rise groups by densification. During the heatwave, the rooftop surface is extremely hot, which deteriorates the top-floor households’ cooling efficiency. In high-rise complexes, fewer households are exposed to rooftop heat. High-rise complexes have an advantage in ventilation due to wider building gaps and cooler upper atmospheres.

I proposed dense city policies to respond to heatwaves based on my results. In the case of traditional row-rise courtyard districts, rooftop greening, cool roofs, and resilience hubs can be considered. In high-rise tower districts., they can be robust against the heat island effect. Since they have little shade, it is appropriate to supplement this. Appropriate guidelines such as wind tunnels and avoiding enclosed complex layouts can be proposed in areas with frequent heatwaves. In public health, providing thermal insulation for dense, low-rise, old houses is preferential. With these implications, I intended to contribute to urban planning and public health.

In future studies, building orientation and diversity can be considered. Also,

more verification through simulation is encouraged. This research is also limited to hot-humid climates, so confirmation in other environments (hot-arid) is promoted. Nonetheless, this study is meaningful because the sustainability of urban densification is reconsidered in extremely hot weather. Also, this research presents ways to mitigate vulnerability and enhance resilience against heatwaves. Ultimately this research contributes to responding to climate change in cities.

Keywords : Climate Change, Heatwave, Dense City, Urban Densification, Cooling Energy, Urban Heat Island, Apartment Complex
Student Number : 2020-20778