

ENVI-met v4.0을 활용한 노후 공업단지 인접 단독주택지의 열 쾌적성 평가

박 중 화^{1*}^{1*}국토연구원 부연구위원

Evaluating thermal comfort in the detached house area adjacent to the old industrial complex using ENVI-met v4.0

Jong-Hwa Park^{1*}^{1*}Associate Research Fellow, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong-si 30147, Korea

[요 약]

본 연구의 목적은 오랫동안 완충녹지의 혜택을 받지 못했던 노후 공업단지에 인접한 단독주택지를 대상으로 ENVI-met v4.0을 활용하여 완충녹지를 조성함에 따른 열 환경개선 효과를 평가한 데 있다. 우선 연구 대상지 내 세 곳 지점에서 온도, 풍속, 습구온도 등이 수집되었다. 둘째, ENVI-met의 미기후 성능은 기온과 평균복사온도를 바탕으로 실측값과 비교하여 결과의 신뢰성을 확보하였다. 셋째, 완충녹지 폭 10m와 폭 20m의 시나리오 구성 후 ANOVA 분석과 t-test를 사용하여 모델 간 통계적 차이를 비교하였다. 본 연구의 결과, 세 모델 간 통계적 차이를 확인하였고 기온, 평균복사온도(Tmrt), PET의 평균값의 차이는 현황과 시나리오 1, 현황과 시나리오 2 사이에서 차이가 있었다. 완충녹지 조성은 연구영역의 열 환경을 개선하였다. 완충녹지 폭이 열 쾌적성에 미치는 차이는 미미한 것으로 확인되었다. 결론적으로 본 연구는 실측을 통해 미기후 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확보하였고, 완충녹지 기능이 열 환경 측면에서도 효과가 있음을 보였다.

[Abstract]

This study aims to evaluate the improvement of thermal comfort by green buffer (GB) using ENVI-met v4.0. The study site focused on the detached house area adjacent to the old industrial complex that has not benefited from GB for a long time. First, temperature, humidity, wind speed, and globe temperature were collected at three points within the study area. Second, the micro-climate performance of ENVI-met v4.0 was compared between field data and model data for model reliability. Third, the current and two scenario models(GB width of 10m and 20m) were compared to identify a statistical difference using ANOVA and t-test. The results show that statistical differences among the three models were confirmed, and the average values of the three variables (Temperature, Tmrt, and PET) differed only between the current environment and Scenario 1, and Scenario 2. The creation of GB improved the study area's thermal environment. GB blocked the heat of the old industrial complex but had no dramatic cooling effect as GB reduced the wind speed. Finally, the width difference of GB showed an insignificant effect on thermal comfort. In conclusion, this study emphasized proper validation for ENVI-met v4.0 using field data and showed that GB is also functional and effective in terms of the thermal environment.

색인어 : 완충녹지, 열적 쾌적성, 노후 공업단지, ENVI-met v4.0, PET**Keyword** : Green buffer, Thermal comfort, Old industrial complex, ENVI-metv4.0, PET<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2023.24.1.153>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 26 December 2022; **Revised** 10 January 2023**Accepted** 11 January 2023***Corresponding Author; Jong-Hwa Park****Tel:** +82-044-960-0301**E-mail:** jh.park@krihs.re.kr

1. 서론

1-1 연구의 배경 및 목적

도시열섬의 심화는 폭염 발생 빈도를 높여 취약한 계층의 건강을 매우 위협한다. 2018년 질병관리본부에서 발표한 온열 질환 감시체계 보고서에 따르면 2018년에 발생한 폭염으로 온열 질환자는 독거노인과 노령층에서 발생하였는데 전체 환자 4,526명 중 고령자가 30.6%를 차지하였다. 더욱이, 저소득층의 경우 폭염으로 인한 사람 위험이 일반인보다 19.4% 높았다[1]. 대체로 사회적 취약계층의 주거지역은 높은 열에 노출되기 쉬운 환경에 놓이기 때문이다.

이는 도시의 열이 공간적으로 균등하게 발생하지 않기 때문이다. 도시 열의 공간적 이질성은 토지이용 특성과 같은 물리적 요소에 의해 영향을 받고 있으며 대표적으로 공업지역은 도시의 열섬효과를 높이는 대표적 공간이며 토지이용 특성 중 가장 높은 지표온도를 보인다[2, 3]. 공업지역은 건물면적 대비 녹지 비율이 매우 낮고 건물 간 밀집도가 높아 열에 취약한 물리적 환경을 갖고 있으며[4, 5], 산업 활동으로 인해 많은 에너지 소비가 발생하여 인공 열 방출이 높은 지역이다[6]. [7]의 연구는 공업지역과 교통혼잡지역에서 발생한 인공 열이 도시열섬을 1~5도 정도 증가시킬 수 있고 바람 방향에 따라 인근 지역 기온을 증가시켰으며, [8]은 공업지역의 복사열이 주변 지역의 대기 온도 상승을 시키는 주요 요인임을 밝히며 공업지역이 주변 지역에 부정적인 열 영향을 미치고 있음을 보였다. 특히 우리나라에 조성된 노후 공업단지는 도시열섬 문제에 주목받기 이전부터 인근 지역에 심각한 환경문제를 미쳐왔다. 이는 1980년대 이전에 공업단지가 조성된 지역은 급격히 증가한 주택 문제를 해결하기 위해 무분별하게 단독주택 위주의 주택공급 정책이 추진되면서 미세먼지, 소음, 악취 등이 전혀 고려되지 못한 결과이다[9]. 이러한 특성은 공업지역과 거리가 가까울수록 주택가격에 통계적으로 유의한 부정적 영향이 만들었다[10, 11]. 애초에 잘못된 주거 기능 입지로 인해 주택이 노후화되고 가격이 하락하면서 취약계층의 주거지로 고려되었다[12].

이러한 공업단지에서 발생하는 부정적 영향에 대응하고자 정부는 공업단지와 주거지역 사이에 공해 차단, 재난 대비, 그리고 도시경관을 향상하고자 도시계획시설로 완충녹지를 조성하도록 1991년에 뒤늦게 「산업입지개발지침」을 제정하였다[13]. 이에 제정 이전에 조성된 공업단지는 경계 지역에 토지를 마련하여 완충녹지 조성을 통해 늦게나마 도시지역으로의 환경문제를 차단하고자 하였다. 그러나 뒤늦은 완충녹지 조성 계획은 「공원녹지법 시행규칙」 제18조 제4항4에 따라 도심을 지나는 도로가 인접한 지역으로서 이미 시가지가 조성된 지역으로 녹지 설치가 곤란한 지역이면 녹지 설치를 아니할 수 있거나, 인근 지역의 토지가격 상승으로 토지확보 및 보상 문제로 인해 장기미집행시설로 남아 여전히 환경문제를 차단하지 못하고 주변 지역을 쇠퇴시켰다. 결과적으로 공업단지

에 인접해 있음에도 오랫동안 녹지의 혜택을 받지 못한 주거지역은 공업단지 내 높은 지표 열과 산업 활동으로 인한 인공 열 영향에 가까이 놓여 높은 열 스트레스에 노출되기 쉽다.

그동안 완충녹지 관련 연구는 공업지역과 주거지역 간 발생하는 소음, 미세먼지에 초점 맞춰 효과를 평가해 왔다 [14]-[16]. 그러나 최근 도시 폭염 발생이 빈번하고 공업지역이 도시 온도를 높이는 주요 공간임에도 완충녹지의 열 환경개선 효과 관련 연구는 매우 미흡한 실정이다. 더욱이 완충녹지의 설치기준은 최소 10m 이상 확보하도록 하고 있어 기존 설치기준에 따라 인접 지역의 열 환경이 얼마나 개선되는지 평가가 필요하다.

따라서 본 연구는 부산광역시의 노후 공업단지와 인접한 열 취약지역을 선정하고, 실측값을 적용한 ENVI-met v.4.0 모델링을 통해 완충녹지 조성에 따른 노후 공업단지에 인접한 노후 단독주택지의 열 환경개선 효과를 평가하고자 한다. 이를 통해 완충녹지의 다기능적 측면에서 열 환경에도 효과가 있음을 확인하고 기존 열 취약지역에 완충녹지가 조성될 경우 노후 공업단지로부터 열적 영향이 차단되어 열 스트레스 개선 효과가 있음을 보고자 한다.

II. 선행연구 고찰

2-1 열 쾌적성과 ENVI-met

최근 도시설계 측면에서 도시 실외 공간의 열 쾌적성은 도시공간의 질적 환경에 대한 도시민의 인식에 직접적인 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중 하나로 주목받고 있다[17]. 열적 쾌적성 평가는 기상변수, 개인특성, 도시설계요소 등을 포함한다. 특히 기상변수 중에서 기온과 평균복사온도는 미기후에서 열적 민감도를 결정하는 가장 주요한 요소이며[18, 19], 풍속과 상대습도 역시 열 쾌적성에 영향을 미친다[20]. 미기후에서 인간이 실제로 느끼는 열적 쾌적성을 설명하기 위해 PMV(Predicted Mean Vote), PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied), PET(Physiological Equivalent Temperature) 지표들이 개발되었다. 이 중 실외 열 쾌적성을 설명하는데 잘 알려진 지수가 PET(°C) 이다[21].

열 쾌적성 평가를 위해 실측[22]하거나 모델링[23]을 통해 수행할 수 있다. 실측은 실제 도시공간과 기상조건을 반영하기 때문에 정확한 결과를 도출할 수 있으나 공간적 변화를 반영하는 데 한계가 있다. 따라서 시공간적 변화를 반영하는 RayMan, SOLWEIG 등과 같은 다양한 모델 중 ENVI-met 이 미기후 평가에 가장 많이 활용되었다. ENVI-met은 열 쾌적성에 영향을 미치는 네 가지 기상변수(온습도, 풍속, 평균 복사온도)와 공간적 변화를 결합하고 고려할 수 있는 기능으로 도시 설계적 관점에서 사용되어왔다. 이에 국외 연구에서는 ENVI-met의 결과에 대한 신뢰성 확보를 위해 현장 실측값과 검증하는 연구들이 수행되었다. 주로 검증에 활용된 기

상변수는 기온과 상대습도였으며 R2값은 0.80~0.96으로 높은 신뢰도를 보였으며[24, 25], [26]연구는 평균복사온도와 PET를 검증하였고 R² 값은 0.86, 0.77로 나타났다.

이처럼 실측값과 비교를 통한 모델의 신뢰성을 확보하고 기존 연구들은 도시 열 쾌적성 개선을 위한 전략으로써 여름철 도시녹화와 지붕, 도로 등에 방사를 높은 재질 적용이 실외 열 환경에 미치는 영향을 모델에 적용해 평가했다[27]~[30]. 그 결과 최고기온 조건에서 최대 평균복사온도를 개선하는 것이 보행자의 실외 열 쾌적성에 가장 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.

국내에서도 ENVI-met을 활용한 연구가 일부 수행되었고 열 쾌적성 개선에 긍정적 효과가 있음을 밝혔다. [31]은 격자 규모 3m로 시뮬레이션 공간을 설정하고 기상청 자료를 적용하였다. ENVI-met을 통해 PMV를 산출하였고 아파트 리모델링 후 단지 내 녹지공간 확보와 수공간 확보가 저층부 기온을 줄였고 열 쾌적성 향상에 긍정적인 효과가 있음을 확인하였다. [32]는 서울시 기상청 자료와 민간이 구축한 온도 자료를 활용하였다. 시뮬레이션 공간 규모는 5m 격자의 300m x 300m x 300m 크기로 구성하였다. 도시 상업 블록 내 협곡에서 1열 식재 가로수보다 2열 식재가 온도 변화에 더 민감하였고 관목이 교목보다 열을 가두는 효과가 더 큰 것으로 나타났다. [33] 연구는 기상청 자료를 반영하여 피복과 녹지 조성에 따른 변화를 비교하였다. 다양한 시나리오 중 아스팔트 포장에 수목 식재 계획이 열 쾌적성 향상에 가장 효과적임을 밝혔다. 시뮬레이션 검증은 기온을 대상으로 6km 떨어진 방재 기상관측 지점과 비교하였고 높은 신뢰성(R²=0.86)을 확보했음을 평가하였다.

2-2 완충녹지의 환경조절 효과

완충녹지는 도시민의 쾌적한 환경을 제공하고 보호하기 위하여 도로와 공업단지에서 발생하는 환경적 영향을 완화하거나 차단하기 위해 환경조절 기능을 최우선으로 조성되었다[13]. 공업단지에서 발생하는 주요한 환경문제는 미세먼지, 소음, 악취였다. 그러나 기후변화가 심각해짐에 따라 도시의 공업지역이 도시열섬을 강화하는 주요 공간으로 밝혀졌다[5].

녹지가 부족한 공업지역에서 완충녹지의 존재는 공업지역과 주변 지역의 기온을 낮추는 데 역할을 할 수 있음에도 이전의 연구들은 여전히 기존의 환경문제에 초점을 맞춰 연구되었다. 완충녹지의 환경조절기능 관련 연구는 도로변[34, 35]과 공단으로부터 발생한 오염을 차단하는 효과를 분석하고자 ENVI-met이나 현장 실측을 통해 진행되었다. 공단과 배후주거지역 사이에 조성된 완충녹지는 미세먼지와 같은 오염물질을 차단하는 효과가 있음을 밝혔다[15]. 다만 시간대, 지형, 풍속, 풍향에 따라 주거지역과 공단 사이는 오히려 오염물질이 정체되는 현상이 나타나기도 했다. 이처럼 완충녹지를 대상으로 열 환경 관련 연구는 매우 미흡한 실정이다.

완충녹지 이외에 가로수, 공원, 옥상녹화와 같은 도시 녹지

는 열 환경 측면에서 긍정적 효과가 있음을 이전의 연구들에서 많이 논의되어왔다[36]~[38]. 구체적으로는 ENVI-met을 활용하여 나무, 벽면녹화 등을 개별 또는 집단으로 조사되었다. 나무와 관련하여 커버울[39] 및 식재 배치[40]가 열적 편익에 미치는 영향을 조사했다. 반대로 녹지계획과 관련한 일부 요인은 도시의 열 쾌적성에 부정적인 효과가 나타나기도 했다. [41]과 [42] 연구는 도시 녹지 커버울 또는 밀도는 높이는 방안이 장파 복사의 손실과 풍속을 저하해 주변 기온을 낮추는 데 효과적이지 않음을 밝히기도 했다.

완충녹지는 단일 나무와 벽면녹화 등과 달리 높은 식재 밀도의 선형으로 조성되어 있어 완충녹지 조성이 주변 지역의 열 쾌적성 향상에 효과적이지 않을지도 모른다. 도시 규모에서 수행된 이전의 연구는 녹지 형태 중 완충녹지와 유사한 선형녹지가 주변 지역 온도를 저감에 가장 효과적인 형태임을 밝혔다[43].

2-3 연구의 차별성

선행연구의 한계점과 본 연구의 차별성은 다음과 같다.

첫째, 기존 선행연구는 다양한 녹화 및 공간전략을 적용해 보고 보행자 수준의 열 쾌적성을 평가하기 위해 ENVI-met을 활용하였고 시뮬레이션 결과의 신뢰도를 검증하고자 실측자료와 비교하였다. 국외 연구와 달리 국내 연구는 열 쾌적성을 평가하는 데 있어 평균복사온도가 중요한 역할을 함에도 검증 단계에서 기온에만 한정되었다. 그리고 도시 미기후 수준의 평가임에도 실측자료가 아닌 기상청 자료를 시뮬레이션에 적용하고 검증에도 활용하여 실제 연구 대상지의 기상 특성으로 보기에는 부족한 부분이 있다.

따라서 본 연구는 실제 연구 대상지에서 보행자 수준의 기상 특성을 반영하고자 3곳 지점에서 실측하고 ENVI-met에 적용하여 시뮬레이션하였다. 또한, 시뮬레이션 결과와 실측값을 시간별로 비교하여 검증했으며 열 쾌적성의 신뢰성을 확보하고자 실측값을 사용하여 평균복사온도를 계산하고 기온과 함께 시뮬레이션 결과와 검증하였다.

둘째, 기존 선행연구는 도시열섬 또는 폭염에 따른 열 취약성 고려보다 일반적인 주거지역(아파트 단지), 공공·상업지역 또는 가상의 공간을 대상으로 물리적 변화와 녹지 조성을 적용하여 열 쾌적성을 조사하였다. 본 연구는 도시열섬을 강화하고 인접 지역에 환경적 영향을 미치는 노후 공업단지와 인접한 취약한 주거지역을 대상으로 연구를 수행하고자 한다. 또한 공업단지와 주거지역이 인접한 대상지인 만큼 기존 완충녹지 연구에서 다루었던 미세먼지, 소음, 악취 등의 환경조절 효과 중 매우 미흡한 열 환경을 평가하고자 한다.

셋째, 선행연구는 다양한 녹지 전략을 적용하여 기온 저감과 열 쾌적성 향상 효과를 조사하고자 단일 식재의 효과 또는 분산형의 식재 패턴 변화를 통해 평가하였다. 따라서 본 연구는 기존의 녹지 전략과 다른 차단 목적의 완충녹지 조성이 주거지역 내 미기후 변화를 확인하고자 한다. 이를 위해 현재 환경을

기준으로 완충녹지 조성을 위한 법적 기준인 폭 10m와 추가로 폭 20m의 완충녹지 조성 후 시나리오를 비교하고자 한다. 또한 완충녹지 조성 계획이 주변 열 저감에 미치는 범위를 확인하고자 시나리오 간 차이를 통계적으로 분석하고자 한다.

따라서 본 연구는 노후 공업단지에 인접한 취약 주거지역을 대상으로 ENVI-met v4.0을 활용하여 실측값과 검증하고 완충녹지 조성에 따른 보행자 수준의 열 쾌적성을 평가하였다. 이를 위해 연구 대상지의 실제 건물의 배치와 높이 등을 반영하였고 연구 대상지 3곳에 기상측정 장비를 설치하여 실시간 기상자료를 수집 후 모델에 적용하였다.

III. 연구방법론

3-1 연구의 범위

1) 공간적 범위

본 연구의 대상지는 부산광역시 사상구 삼락동의 1970년대 조성된 사상공업단지의 일부 공장과 노후 단독주택지이다(그림1). Landsat 8 위성자료의 지표온도 지도에서 나타나듯이 공업지역들은 다른 지역에 비해 높은 지표온도가 나타나고 있으며 사상공업단지 역시 34℃ 이상의 높은 지표온도가 나타났다. 이러한 공업단지와 인접한 주거지역 중에서 노후 단독주택지(30년 이상 주택, 60㎡ 이하 주택, 단독주택 비율)이면서 취약계층(1인 가구, 월세 가구, 65세 이상 인구 비율) 거주가 높은 지역을 우선 고려하였다.

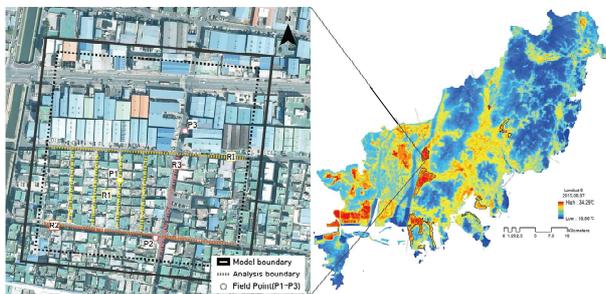


그림 1. 연구 대상지 및 2018년 8월 3일 현장측정지점(P1~P3) 및 분석영역(R1~R3, RI가로), (RI: 노후 공업지역과 노후 단독주택지 사이 가로)(좌), Landsat 8 지표 온도(우)

Fig. 1. Field measurement point on August 3, 2018(P1~P3), and Analysis boundary(R1~R3, RI), (RI: Street on between old industrial complex and detached housing area)(Left), Land surface temperature(Right)

연구 대상지에서 단독주택지는 1~2층 높이의 평지붕인 40년 이상 된 건물이며 격자형으로 배치된 지역이다. 건물 구조는 블록조이며 가로 바닥 재질은 아스팔트와 콘크리트이다. 연구 대상지는 경사가 없는 평평한 지역이며 녹지는 조성되어 있지 않다. 주거지역 맞은편의 공장들은 파란색 지붕,

11m 높이, 벽면은 회색의 철 재질로 건축되어 있으며 기계와 금속 업종의 영세한 기업들이 위치 해 있다. 인구적·사회적 특성은 노인 인구 17%, 1인 가구 39%, 월세 가구가 40%가 거주(집계구 기준, 2015년)하고 있어 취약계층의 비율이 높다.

2) 시간적 범위

연구의 시간적 범위는 2018년 8월 3일부터 8월 4일이다. 기상청 관측자료에 따르면 8월 3일에 최고기온 33.4℃, 평균 29.9℃를 기록하였고 8월 4일은 최고기온 33.8℃, 평균 30.1℃를 기록하였다. 부산광역시는 2018년 7월 20일부터 8월 15일까지 18일 동안 폭염주의보와 경보가 발효되었고 7월 25일부터 8월 6일까지 12일 연속 폭염을 기록하였다.

3-2 ENVI-met v4.0과 시뮬레이션 환경 조건

ENVI-met v4.0은 도시의 공간을 격자로 나누고 기상 결과의 정확한 시뮬레이션을 위한 물리적 과정들을 기준에 접합한 2·3차원 형태로 예측하는 미기후 기상 분석 프로그램이다[44]. 시뮬레이션 환경구성에 사용된 모델 매개변수와 기상자료는 표 1과 같다. 시뮬레이션 영역은 3D 그리드로 세분화할 수 있으며 그리드 면적이 2m, 모델 영역은 130×130×30(250m×250m×60m)으로 총 62,500㎡의 면적으로 구성되었다.

표 1. 시뮬레이션 환경 조건

Table 1. Simulation environmental conditions

Model parameter	Simulation time: 28h
Model boundary (x,y,z)	130, 130, 30
Grid size (dx,dy,dz)	2, 2, 2
Surface material	Concrete & Asphalt
Building condition	Detached house: Concrete(default), Factory: still sandwich panel(Blue&Gray)
Location on Earth	Busan/South Korea, 37.17, 128.98
Rotating Model based on North	4°
Meteorological data	date: 2018. 8. 3.
Wind (10m a.g.l.)	2.8m/s
Wind direction	340(NNW)
Specific Humidity (2,500m a.g.l.)	7.0g/kg(default)
Roughness length	0.1(default)
Material emissivity	Building: 0.90, Floor(Concrete & Asphalt): 0.90, Grass: 0.95, Tree: 0.95

본 연구의 모델 영역은 실제 연구 대상지의 범위로부터 경계 영역을 20m씩 더 확보하여 구성하였다[26]. 이는 모델 영역에서 경계 영역은 난기류 영향으로 변동성이 크게 나타

날 수 있어 결과의 신뢰성에 영향을 미치기 때문이다[45]. 시뮬레이션 모델 영역 중 경계 부분은 바람에 따른 변화를 크게 받아 결과의 정확한 해석에 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

시뮬레이션 시간은 2018년 8월 3일 오전 4시부터 8월 4일 오전 8시까지이며 1시간 간격으로 28시간 동안 실행하였다. 모델의 정확도를 높이기 위해 시뮬레이션 시작은 실측 시간보다 4시간 전인 오전 4시부터 실시하였다. 시뮬레이션 결과는 보행자의 바닥 면으로부터 1.4m 높이의 값을 사용했다.

1) 실측지점 및 분석영역 특성

본 연구에서 실측과 검증에 위해 사용된 기상자료는 맑은 하늘의 이틀 동안 세 지점(P1-P3)에서 측정되었다(그림 1). 그림 2와 표2는 실측지점별 공간 현황 및 특성을 보여준다.

P1 지점은 2층 규모의 단독주택지 내 가로이다. 가로 향은 북-남향이며 가로길이는 88m이며 4m의 좁은 폭을 갖고 있다. 실측지점은 가로 내 동쪽 벽면에 위치하며 콘크리트 바닥의 약 2m 높이 담장으로 막혀있다. P2 지점은 동-서향의 3~4층 높이인 근린생활건물과 단독주택지 사이에 있으며 길이 200m, 폭 8m 가로 내에 위치한다. 바닥 재질은 아스팔트이며 실측지점은 사거리 중 남서쪽 4층 높이의 건물 벽면에 위치한다. P3 지점은 공단과 주거지역을 연결하는 북-남향의 가로길이 75m, 폭 8m~12m의 가로에 있다. 실측지점은 높이 11m 높이의 공장건물 사이에 위치한다. 동쪽 건물에 면하고 있으나 주차 공간이 있어 건물은 약 4m 정도 후퇴되어 있다. 바닥 재질은 아스팔트와 콘크리트가 혼재되어 있으며 자동차 통행이 자주 발생한다.



그림 2. 실측지점별 공간 현황
Fig. 2. Spatial view on field measurement point

표 2. 분석영역 내 가로 지점별 특성
Table 2. Characteristics of each street point in the study area

	N-S (P1)	W-E (P2)	N-S (P3)	W-S (RI)
Length (m)	85	210	120	210
Width (m)	4	8	8	10
Building characteristics	1~2 floor of detached house	North - 1~2 floor of detached house, South - 3~4 floor of neighborhood	Factory height: 11m	North-11m of Factory / South - Detached house
Surface material	Concrete	Asphalt	Concrete & Asphalt	Concrete & Asphalt

완충녹지 구성에 따른 효과는 그림 1의 분석영역 내 시뮬레이션 결과를 사용한다. 세 개의 실측지점이 위치한 가로(R1~R3, 점선)와 공장과 주택들 사이 위치한 RI 가로의 결과를 비교·분석하였다. RI 지점의 가로는 북쪽으로 11m 높이의 철 재질의 공장과 남쪽으로는 1~2층의 노후단독주택이 위치한다. 분석영역 내 가로길이는 210m이며 가로의 폭은 공장의 주차 공간을 포함하여 10m이다. 가로의 향은 동-서향이며 바닥은 아스팔트와 콘크리트가 혼재되었고 단독주택에 면하여 자동차들이 주차되어 있다.

2) 기상자료

측정 센서들은 바닥 면으로부터 1.4m 높이에 설치하였고 온도, 습도, 풍속, 풍향, 흑구온도를 데이터 로고를 통해 총 31시간(8월 3일 오전 8시~8월 4일 오후 4시까지) 동안 수집하였다. 모든 센서로부터 측정된 자료는 1분마다 기록되었으며 시뮬레이션에 사용하기 위해 세 지점의 매시간 값을 평균하였다. 측정 시간 동안 최고기온은 36.3℃(8월 4일, 오후 2시)였고 최저기온은 28.8℃(8월 4일, 오전 6시)로 나타났으며, 장비의 한계로 흑구온도는 P1 지점에서만 실측했으며 최고 39.7℃, 최저 28.2℃로 측정되었다. 풍속은 최고 1.4m/s이며 최저 0.1m/s로 측정되었다. 다만 시뮬레이션 환경 조건에서 풍속은 10m a.g.l.의 값을 요구하고 있어 연구 대상지로부터 남서쪽 약 600m 떨어진 기상청 AWS의 측정값을 사용하였다.

지점별 실측에 사용된 장비는 HOBO 회사의 온도, 풍속 및 풍향 스마트 센서들을 조합하였고 U30NRC data logger를 통해 실시간 기상자료를 수집하였다. 온도 센서에는 쉘드를 씌어 직접적인 일사 영향을 차단하였다. 흑구온도는 회색(RAL 7001)으로 도장한 40mm 탁구공에 T-type copper-thermocouple sensor를 삽입하여 측정하였다 [46]. 각 센서의 제품명과 정확도는 표 3과 같다[47].

표 3. 측정 센서 및 정확도
Table 3. Measurement sensors information and Accuracy

	Temperature sensor	Humidity sensor	wind sensor	wind direction sensor	Globe temperature sensor
Name	HOBO S-THC-M002		HOBO S-WSB-M003	HOBO S-WDA-M003	T-type copper-thermocouple sensor
Accuracy	±0.21℃	±2.5%	1.1m/sec	±7 degree	±1.0℃

3) 건물 속성자료

ENVI-met에서 건물 속성은 3D input data를 이용하여 구체적인 건물의 특성을 구성할 수 있다. 건물 표면으로부터 발생하는 열적 영향을 고려하기 위해 주택은 기본값의 콘크리트를 적용하였고 공장건물은 스테인리스와 알루미늄이 결합된 샌드위치 패널을 적용하였다. 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 높이기 위해 본 연구는 구체적으로 공장의 물리적 속성

을 적용하였다. 공장 벽면은 밝은 회색, 지붕은 파란색을 적용하였고 방사율은 0.9, 반사율은 0.33(밝은 회색), 0.28(파란색)을 각각 적용하였다. 방사율과 반사율이 높을수록 낮은 표면 온도가 나타나는 데 공장의 재질에 적용된 샌드위치 패널의 방사율과 반사율 정보는 ASTM(American society for testing and materials)으로부터 얻었다[48]. 공장의 벽과 지붕의 두께는 100T와 150T를 적용하였다. 위 속성자료들은 ENVI-met의 manage database에 추가하여 사용하였다.

3-3 열적 쾌적성 평가

본 연구는 열 쾌적성 평가를 위해 대표적인 지표인 평균복사온도(Tmrt; Mean Radiation Temperature)와 PET(Physiologically Equivalent Temperature)를 사용하였다. Tmrt는 시뮬레이션에 따른 열 쾌적성 값의 신뢰성을 확보하기 위해 실측값과 시뮬레이션 값을 비교하였다.

평균복사온도(MRT)는 대기의 단파와 장파 복사가 결합된 값으로 인간의 에너지 균형과 열 쾌적성을 결정하는 중요한 기상 매개변수 중 하나이다[49]. 평균복사온도는 연구 대상지에서 실측한 값을 사용하여 다음과 같은 식을 통해 계산되었다[46].

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273.15)^4 \frac{1.335 \times 10^8 WS^{0.71}}{\epsilon D^{0.4}} \times T_g - T_a \right]^{0.25} - 273.15 \tag{1}$$

Ta: 기온(°C), Tg: 흑구 온도(°C), D: 흑구 직경(m), WS: 풍속(ms-1), ε: 방사율(ε=0.95).

본 연구는 열 쾌적성을 평가하기 위해 ENVI-met v4.0의 보조 프로그램인 BioMet(v1.0)을 사용하였다. BioMet(v1.0)은 ENVI-met v4.0의 결과를 바탕으로 보행자 수준의 열 쾌적성 평가지표인 PET를 산출해주는 프로그램이다. 본 연구는 열 쾌적성 평가를 위해 PET를 사용하였다. PET는 1999년 도시 및 지역 계획가들을 위해 독일의 [50]로부터 제안된 보행자 관점의 열 스트레스 지표이며 다음의 열 균형 방정식을 기반으로 한 생리학적 열 균형 모델(MEM)을 사용하여 산출된다.

$$S + W + R + C + E_{RE} + E_D + E_{ws} = 0 \tag{2}$$

S: 체열저장량, W: 신체적 활동량, R: 신체의 순 복사에너지 C: 대류 열의 흐름, Ere: 호흡에 따른 발열과 가슴에 대한 열 흐름의 합, Ed: 신체활동에 의한 수분을 피부로부터 증발시키기 위한 잠열 흐름, Ews: 땀 증발에 따른 잠열의 흐름

PET는 실내 환경에 초점이 맞춰진 PMV보다 외부 환경에서 보행자에게 미치는 열 영향을 더 잘 설명한다[51]. PET는 표 4에서 제시된 기준에 따라 열 스트레스를 판단한다[21]. 예를 들어 PET 29°C ~35°C는 Warm에 해당한다.

표 4. 열 지각 등급과 인간의 생리적 열 스트레스에 대한 PET 범위
Table 4. Thermal perception level and PET range for physiological thermal stress of human

PET(°C)	Thermal perception	Grade of Physiological stress
4	Very Cold	Extreme cold stress
8	Cold	Strong cold stress
13	Cool	Moderate cold stress
18	Slightly Cool	Slight cold stress
23	Comfortable	No thermal stress
29	Slightly Warm	Slight heat stress
35	Warm	Moderate heat stress
41	Hot	Strong heat stress
	Very Hot	Extreme heat stress

PET를 산출하기 위해서는 기상조건과 함께 인간의 대사 열량과 개인적인 변수(예, 나이, 성별, 의류, 체중, 키)를 고려해야 한다. 따라서 본 연구는 BioMet(v1.0)의 기본값(즉, 연령:35세, 성별:남성, 대사율:80w/m², 의류:0.9, 체중:75kg, 신장:1.75m)을 적용하여 PET를 산출하였고 완충녹지 조성에 따른 주거지역의 열 쾌적성 개선 효과를 비교하였다.

3-4 시뮬레이션 시나리오

본 연구는 공업지역과 인접한 노후 단독주택지를 대상으로 세 가지 시나리오를 통해 현재 공간구조에서 열적 쾌적성과 완충녹지 조성에 따른 주거지역의 열 환경개선 효과를 평가하였다. 현재 환경을 가상공간에 구성하고 공장과 인접한 노후 단독주택지의 열 환경을 평가한다. 시나리오 1은 공장과 인접한 주거지역의 내 단독주택을 없애고 폭 10m의 완충녹지를 조성하여 열 환경개선 효과를 평가한다. 마지막으로 시나리오 2는 완충녹지를 폭 20m로 넓혀 조성하고 계획적 차이를 비교한다. 그림 3은 연구에 사용한 시나리오 모델을 보여준다.

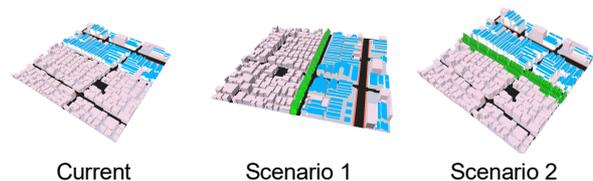


그림 3. 시나리오 현황
Fig. 3. Scenario model

1) 완충녹지 조성 시나리오

완충녹지 조성 효과를 평가하기 위해 현황과 시나리오 1, 시나리오 1과 2의 시뮬레이션 결과를 각각 비교한다. 우선 완충녹지 조성 효과는 현황과 시나리오 1간의 기온, 평균복사온도, PET 차이를 통해 설명한다. 그다음 시나리오 1과 2를 비교하여 완충녹지 폭에 따른 주거지역의 PET 개선 효과 차이

를 비교한다. 공장으로부터 열 영향을 설정하고자 시뮬레이션 조건에 풍향은 340도(북북서)를 적용하였다. PET는 연구 대상지 내 가로 방향, 가로 폭, 완충녹지까지 거리, 그리고 바닥 재질을 고려하여 네 곳의 가로 지점에서 비교하였다.

본 연구 대상지는 새로 완충녹지를 조성할 공간이 없어 기존 주택의 철거를 가정하고 선행연구를 통해 조사된 식생 조건을 바탕으로 완충녹지를 모델에 적용하였다. 완충녹지의 주요 식생 수종은 상록수 위주이며 조성 기준은 높이가 4m 이상 확보해야 한다[52]. 따라서 완충녹지는 식재 높이 10~15m, 수경 7~13m의 ENVI-met에서 기본값으로 제공하는 상록수(소나무, 잣나무, 아카시아)를 적용하였다.

3-5 통계분석

본 연구는 현황, 시나리오 1, 시나리오 2간 시뮬레이션 결과를 비교하고 각 분석 모델의 미기후 지표의 평균을 통계적으로 비교하고자 R-studio를 사용하여 일원 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였다. 이후 사후검증을 위해 본페로니 검증(Bonferroni correction)을 실시하였다. 다음으로 완충녹지 조성에 따른 기온 감소 효과가 어떻게 달라지는 지점별 기온 차이를 비교하고자 2-way t-test를 수행하였다. 8월 3일~4일의 13시부터 16시까지 시간대에 단독주택지 가로 내 지점별 기온, Tmrt, PET 자료를 추출하고 현황과 시나리오 1, 2의 결과와 각각 비교하였다.

IV. 분석 결과

4-1 ENVI-met 시뮬레이션 검증

ENVI-met model의 신뢰성을 보고자 2018년 8월 3일 오전 8시부터 4일 오전 8시까지 현황 시뮬레이션 값과 현장 측정값을 비교하여 검증하였다. 결과의 유효성을 확인하고자 세 개 지점(P1~P3)에서 1시간 간격으로 1.4m 높이의 기온(Ta)과 평균복사온도(Tmrt)를 고려하였다. 25시간 측정값을 고려하여 기온은 75쌍을 비교하였고 평균복사온도는 장비의 한계로 한 지점에서만 측정되어 P1 지점의 25쌍을 비교하였다. ENVI-met 모델의 정확성은 모델 평가의 RMSE, MAE 그리고 MBE를 통해 시험 되었다[26, 53].

표 5. 기온, 평균복사온도의 시뮬레이션과 실측값 간 정확성 검증
Table 5. Validation of temperature and mean radiation temperature between simulation and field value

Simulation-Field	RMSE(°C)	MAE(°C)	MBE(°C)	R ²
T _a	0.7	0.2	0.1	0.91
T _{mrt}	6.0	5.6	-4.2	0.93

sample pairs: Ta= 75, Tmrt= 25

각 RMSE, MAE, MBE의 값이 0에 가까울수록 측정값과 시뮬레이션 값의 결과가 서로 유사하다는 것을 의미한다. 표 5는 시뮬레이션 결과와 실측값의 차이를 보여준다. Ta와 Tmrt에 대한 RMSE는 각각 6.0°C와 0.7°C 차이를 보였다. MAE 값은 Ta가 0.2°C 낮았고 Tmrt는 5.6°C가 높은 것으로 나타났으며 MBE는 Ta가 4.2°C 낮았으며 Tmrt는 0.1°C 높은 것으로 나타났다.

그림 4는 1시간 간격의 Ta에 대한 시뮬레이션 값과 실측값 간의 선형회귀분석 결과를 보여준다. Ta와 Tmrt의 시뮬레이션과 실측값 간의 R-square는 각각 0.91과 0.93으로 강한 상관관계를 보였다. 따라서 ENVI-met 모델의 결과는 노후 공업단지와 인접 단독주택지의 복잡한 열 환경을 시뮬레이션하는 데 적합한 것으로 나타났다.

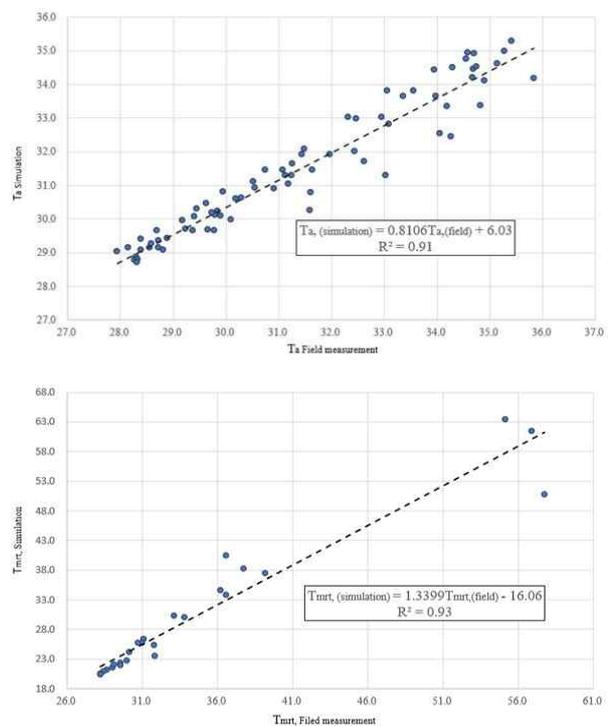


그림 4. 기온(Ta)(위), 평균복사온도(Tmrt)(아래)의 시뮬레이션 결과와 실측값 간 비교((2018.8.3~4, 25시간 측정값))

Fig. 4. Validation of temperature(Ta, top), mean radiation temperature(Tmrt, bottom) between simulation and field value

4-2 ANOVA 분석 결과 및 검증

본 연구는 모델 간 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하기 위해 일원분산분석(ANOVA)을 실시하였다(표 6). 연구 대상지의 현황, 시나리오 1(완충녹지 10m), 시나리오 2(완충녹지 20m)의 ANOVA 분석은 기온, 풍속, Tmrt, PET 값을 각각 실행하였고 시나리오 간 차이는 풍속을 제외하고 유의수준 0.01에서 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 풍속의

경우 높고 조밀한 공장건물과 완충녹지 구성에 따른 차단 효과로 통계적인 차이를 보이지 못한 것으로 보인다.

표 6. ANOVA 분석 결과

Table 6. Analysis result of ANOVA

Model	Variables	F-ratio
Current environment, Scenario1, Scenario2	Temperature	5.205**
	Wind	0.461**
	Tmrt	6.170**
	PET	5.871**

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

모델 간 세 변수의 평균값이 통계적 차이가 있는지 검증하고자 본페로니 검정(Bonferroni correction)을 실시하였다(표 7). 분석 결과, 현황과 시나리오 1, 현황과 시나리오 2간에는 기온, Tmrt, PET의 평균값 차이가 유의하게 나타났으나 시나리오1과 2간에는 유의하지 않는 것으로 나타났다. 이는 완충녹지 면적 증가가 지역의 기온 감소와 열 쾌적성 향상에 매우 큰 차이를 만들지 못한 것으로 보인다.

표 7. Bonferroni 검정 결과

Table 7. Result of Bonferroni correction

Variables	Model	Current	Scenario 1
Temperature	Scenario1	-0.231 *	
	Scenario2	-0.371 ***	-0.140
Tmrt	Scenario1	-6.385 *	
	Scenario2	-6.574 **	-0.190
PET	Scenario1	-3.570 *	
	Scenario2	-3.715 **	-0.145

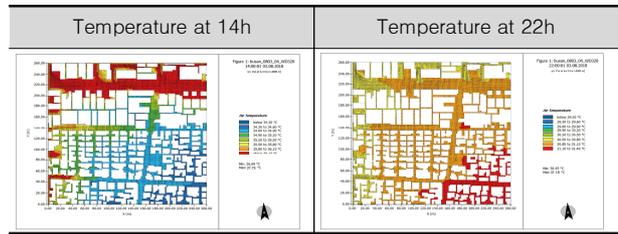
*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

4-3 연구 대상지 내 미기후

1) 공업지역과 주거지역의 기온변화

본 연구는 시뮬레이션을 통해 도출된 높이 1.4m의 기온, 평균복사온도, PET 값을 사용하여 완충녹지 구성에 따른 미기후 변화를 평가하였다. 표 8은 시뮬레이션을 통해 하루 중 가장 더운 14시와 밤 시간대 22시 기온을 지도로 표출한 결과이다. 14시 기준 시뮬레이션 결과에서 가장 높은 기온은 37.7℃이며 가장 낮은 온도는 26.7℃로 나타났다. 다만, 최저 기온은 시뮬레이션 상 경계 영역에 해당하여 과소 측정됐을 가능성이 있다. 기온 분포는 낮 시간대인 14시에 공단지역이 인접한 단독주택지역보다 더 높은 기온을 보였지만 밤 시간대인 22시에는 역전하였다. 밤 시간대에는 단독주택지역은 노후 공단과 비교하여 더 높은 기온을 보이거나 유사한 기온 분포를 보였다.

표 8. 노후 공업단지와 인접 단독주택지의 기온 시뮬레이션 결과
Table 8. Simulation results of temperature in the study area



시뮬레이션 결과를 통해 연구 대상지 내 물리적 환경에 따라 기온 차이가 명확히 나타났고 공업지역과 노후 단독주택지 간 기온을 1시간 간격으로 비교해보았다(그림 5). 최고기온이 나타난 시각은 14시였으며 공업지역(36.6℃)이 노후 단독주택지(34.8℃)보다 1.8℃ 높았다. 반면에 최저기온은 오전 6시로 측정되었으며 노후 단독주택지(29.0℃)가 공업지역(28.5℃)보다 0.5℃ 더 높게 나타났다. 공업지역은 오전 9시부터 노후 단독주택지보다 기온이 높게 나타나기 시작했으며 20시부터 노후 단독주택지가 공업지역보다 0.1℃ 높게 나타나 기온이 역전하였다.

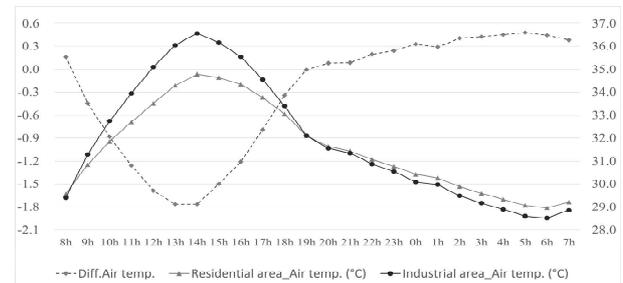
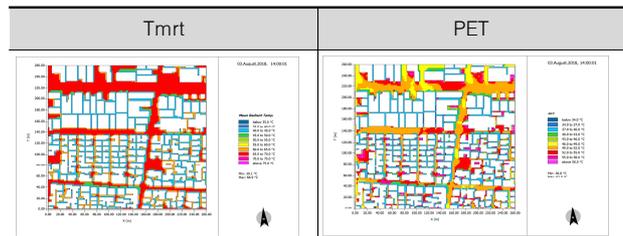


그림 5. 노후 공업단지와 인접 단독주택지 간 기온 차이 및 기온 변화
Fig. 5. Temperature difference and variation between old industrial complex and neighboring detached housing area

2) 가로 향에 따른 열 쾌적성 평가

표 9. 열 쾌적성 평가 시뮬레이션 결과(14시 기준)

Table 9. Simulation result of thermal comfort at 14h



가로공간의 열적 쾌적성은 가로 향 및 건물로 인해 형성된 그늘과 일사 패턴에 따라 다르게 나타났다(표 9). 평균복사온도는 물리적 환경에 따른 대상지 내 열적 차이를 설명한다. 동

서향 가로공간들의 평균복사온도는 평균 58.8℃로 남북 향 가로(40.9℃)보다 훨씬 높게 나타났다. 주택과 공장 사이의 동서향 가로의 평균복사온도는 67.7℃를 보였다. 외부 공간의 평균복사온도는 사람들의 외부 열적 쾌적성에 영향을 미친다.

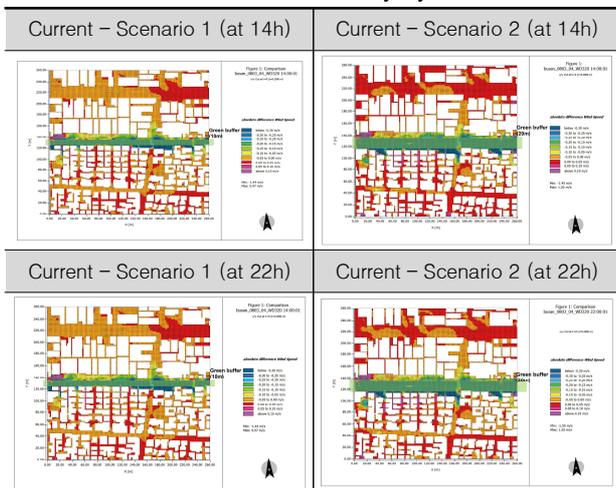
열 쾌적성(PET)은 외부 공간에서 사람이 느끼는 체감온도 수준을 나타낸다. 동서향 가로공간의 낮 동안 평균 PET는 44.6℃로 열 쾌적성 분류기준에서 ‘매우 더운’ 수준의 열적 인식을 나타낸다. 반면 남북향 가로공간에서는 평균 37.5℃로 ‘더운’ 수준의 열적 인식에 속하였다. 공장과 주거지역 사이의 동서향 가로는 평균 51.6℃로 나타났다. 밤 시간대 대상지 내 동서향, 남북향 가로의 열적 쾌적성은 각각 27.3℃, 26.6℃를 보였다.

4-4 완충녹지 조성 효과

1) 완충녹지 조성에 따른 풍속 변화

완충녹지 조성에 따른 풍속 변화는 표 10과 같다. 세 모델 간 풍속의 통계적 차이는 유의하지 않았으나 완충녹지 조성에 따른 풍속의 공간적 변화는 확인할 수 있었다. 완충녹지 10m를 조성한 경우 완충녹지 주변은 최대 0.1m/s~0.3m/s 이상 풍속이 증가하였으나 노후 공업단지와 단독주택지 내가지 영향이 미미한 것으로 보였다. 이는 완충녹지의 조성이 북서쪽에서 불어오는 바람을 차단하는 효과를 보인 것으로 판단된다. 단독주택지의 경우 현황 시나리오와 비교하여 풍속 변화가 거의 없는 것은 좁은 가로공간 때문으로 보인다. 현황 시나리오에서는 풍향이 북서쪽에서 불어오는 방향으로 보여주었으나 완충녹지가 조성되었을 때 완충녹지에서 공간과 단독주택지로 불어 나가는 것으로 나타났다.

표 10. 시나리오 간 풍속 시뮬레이션 차이 결과
Table 10. Results difference of windy by scenario



2) 완충녹지 조성에 따른 기온 저감 영향 범위

완충녹지 조성은 인접한 노후 단독주택지의 온도 감소에 영향을 미쳤다. 표 11은 완충녹지로부터 10m 거리마다 측정

한 온도 변화를 보여준다. 완충녹지 폭에 따른 효과를 보고자 법적 최소기준인 10m와 20m를 비교하였다. 낮 시간대(13시~16시) 기준, 현황과 비교하여 폭 10m의 완충녹지는 완충녹지로부터 단독주택지 내 10m 지점에서 0.23℃, 70m 지점에서 0.09℃를 감소시킨 것으로 나타났다. 폭 20m의 완충녹지는 완충녹지로부터 단독주택지 내 10m 지점에서 0.33℃, 60m 지점에서 0.10℃를 감소시킨 것으로 나타났다. 결과적으로, 완충녹지의 폭을 2배 넓게 조성하면 완충녹지 반경 10m에서 최대 0.1℃ 감소 효과가 더 큰 것을 확인할 수 있었다.

표 11. 완충녹지 조성 폭 차이에 따른 거리별 기온 감소 효과
Table 11. Temperature decrease effect at the distance point by green buffer width

Current - Scenario 1 (GB width 10m)			Current - Scenario 2 (GB width 20m)		
Width 10m	13h ~ 16h (n=40)		Width 20m	13h ~ 16h (n=24)	
	diff.	t		diff.	t
10m	-0.23	2.25 *	10m	-0.33	3.27 **
20m	-0.20	2.55 *	20m	-0.25	3.77 ***
30m	-0.18	3.30 **	30m	-0.23	3.55 ***
40m	-0.18	3.05 **	40m	-0.24	3.52 ***
50m	-0.17	2.85 **	50m	-0.22	3.19 **
60m	-0.15	2.25 **	60m	-0.10	2.03 *
70m	-0.09	2.54 *			

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

3) 가로 향에 따른 열적 쾌적성 변화

표 12는 가로 향에 따른 Tmrt와 PET의 결과를 보여준다. 측정지점을 기준으로 3곳의 가로(R1~R3)와 공장과 단독주택지 사이의 가로(RI)에 대하여 시나리오 간 차이를 t-test로 분석하였다. Tmrt와 PET의 변화는 기온보다 더 확연한 공간적 차이를 보여주었다. R1 가로의 현황과 시나리오2 간 PET 차이만 제외하고 유의한 결과로 나타났다.

PET와 Tmrt간 공간적 패턴은 유사했으며 완충녹지 주변에서 가장 큰 열 쾌적성 개선 효과를 보였다. 각 가로의 열 쾌적성은 매우 더움으로 좋지 못한 열 환경에 놓여있다. 현황과 시나리오 1을 비교했을 때, 낮 시간대(12시~16시) 기준 RI 가로에서 Tmrt와 PET는 각각 21.7℃, 12.5℃ 감소하였으며 현황과 시나리오 2에서 Tmrt와 PET는 각각 21.5℃, 12.5℃ 감소하였다. 완충녹지 폭과 관계없이 RI가로에서 PET는 매우 더움에서 더움으로 한 단계 개선되었다. 반면에 R1~R3 지점의 PET 개선 효과는 0.3℃~1.8℃ 수준으로 매우 미미한 것으로 나타났다. 표 13은 시나리오 간 PET의 차이를 시각적으로 보여준다.

표 12. 완충녹지 조성 차이에 따른 측정 지점별 평균복사온도 및 PET 차이

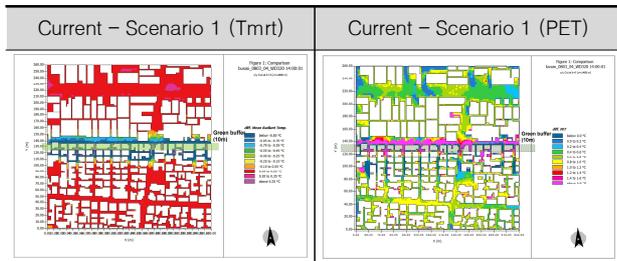
Table 12. Difference of Tmrt and PET by green buffer width

Street	Variables	12h~16h		
		Current (°C)	Current - Scenario 1	Current - Scenario 2
			Diff.(°C)	Diff.(°C)
R1 (N-S)	Tmrt	49.01	-1.27 ***	-1.52 ***
	PET	41.22	-0.25 *	-0.26
R2 (N-S)	Tmrt	50.35	-1.28 ***	-1.47 ***
	PET	41.84	-0.38 ***	-0.56 ***
R3 (E-W)	Tmrt	50.16	-1.50 ***	-1.82 ***
	PET	44.22	-0.82 ***	-1.14 ***
RI (E-W)	Tmrt	66.53	-21.65 ***	-21.54 ***
	PET	51.78	-12.46 ***	-12.47 ***

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

표 13. 현황-시나리오 1간 14시경 열 쾌적성 차이

Table 13. Thermal comfort difference between current environment and scenario 1



V. 논의 및 결론

본 연구는 오랫동안 완충녹지의 혜택을 받지 못했던 노후 공업단지에 인접한 단독주택지를 대상으로 완충녹지를 조성함에 따라 열 쾌적성이 얼마나 개선되는지 평가하였다. 이에 부산광역시 사상구 삼락동의 사상공단에 인접한 노후 단독주택지를 대상으로 기상을 실측 후 모델값과 검증하고 완충녹지 조성 시나리오를 구성하여 ENVI-met을 통해 비교·분석하였다.

노후 공단과 단독주택지는 시간대에 따라 서로 다른 기온 분포를 보여주었다. 낮 시간대에는 노후 공단 내 기온이 단독주택지에 비해 높게 나타났으나 밤 시간대에는 기온이 역전하는 결과를 보였다. 이는 공장의 물리적 환경과 풍속이 기온에 미친 영향으로 보인다. 노후 공단 내 공장들은 알루미늄과 철 재질로 건축되어 낮 동안에 일사에 쉽게 가열되었고 밤 시간대에는 콘크리트 위주의 단독주택지와 달리 쉽게 열을 방출하여 노후공단 내 기온이 더 낮은 결과를 보였다. 또한, 밤

시간대 북서쪽에서 불어오는 바람은 공업지역 내 온도를 더 가속하고 열을 남쪽으로 밀어냈지만 노후 단독주택지 내 밀집된 건물과 남북 향의 좁은 가로에 열이 가두었다.

완충녹지의 조성은 단독주택지의 취약한 열 환경을 개선하는데 기여했음을 보여주었다. 단독주택지는 낮 시간대에 기온 감소와 열 쾌적성이 향상되었으며, 이는 완충녹지 조성에 따른 그늘과 증발산 효과로 보인다[54, 55]. 이러한 차이가 시뮬레이션 결과에서 나타나는 이유는 기온과 PET의 시공간적 변화가 건물환경, 녹지 여부, 시간에 따른 에너지 수지 차이로 매우 다양하게 나타날 수 있기 때문이다[26]. 특히, 대상지 내 노후 공단과 단독주택지 사이(RI 지점, 동서 향) 가로는 완충녹지 조성으로 가장 큰 냉각 효과를 보였다. 완충녹지 주변은 풍속을 0.1m/s 증가시켰으며 완충녹지 내 낮은 기온과 높은 습도가 주변 지역 냉각에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 일반적으로 동서 향 가로는 북남 향 가로보다 일사량에 더 오래 노출되어 높은 기온과 열 스트레스를 보여준다[56]. 이는 공장건물과 비슷한 높이의 캐노피를 가진 완충녹지가 그림자를 생성함으로써 가로 내 열 스트레스를 완화된 것으로 보인다. 결과적으로 일사에 노출되는 범위와 시간을 오랫동안 차단하는 것이 가장 효과적인 전략으로 보인다.

마지막으로 완충녹지가 주변 지역의 열 쾌적성에 미치는 효과에 있어 완충녹지 폭에 따른 효과를 비교해보았다. 완충녹지 폭의 증가는 나무와 초지의 양적 증가와 습도 증가에 따른 증발산 효과가 강하게 만든다[57]. 완충녹지의 조성은 극적인 기온 감소 효과를 만들지는 않았으나 완충녹지와 가까울수록 기온 감소가 높았으며 모델 분석상 70m까지 약 0.1°C 감소 효과를 보였다. 불행하게도 완충녹지 폭의 증가는 냉각 효과와 열 쾌적성을 약간 향상했을 뿐 시나리오1(폭 10m)과 비교하여 차이가 거의 없었다. 완충녹지가 선형으로 밀도 높게 식재되어 폭과 무관하게 북서쪽으로부터 불어오는 바람을 차단하여 넓은 범위까지 냉각 효과가 확산하지 못하게 만들었기 때문으로 판단된다. [41]과 [42] 연구들은 도시 녹지 커버율 또는 밀도는 높이는 방안이 장파 복사의 손실과 풍속을 저하해 주변 기온을 낮추는 데 효과적이지 않음을 밝히기도 했다. 더욱이 단독주택지 내 가로가 3m로 매우 좁은 탓에 완충녹지의 냉각 효과가 광범위하게 영향을 미치지 못한 것으로 보인다. 그럼에도 본 연구는 완충녹지 조성시 노후 공단의 열 영향을 차단하고 인접 지역의 기온 저감 기여를 확인하였다.

본 연구는 다음과 같은 한계를 갖고 연구를 수행하였다. 우선, ENVI-met v4.0의 환경에서 건물 형태 및 재질, 녹지, 지표면 등을 비교적 단순하게 표현되어 실제 환경을 구현하는데 한계가 있다. 또한, 실제 공장의 생산 활동으로 발생하는 인공 열을 측정하고 시뮬레이션 반영에 한계가 있어[53], 공업지역의 열적 영향은 건물과 바닥으로 방출하는 열에 의존할 수밖에 없었다. 둘째, 완충녹지 조성과 함께 건물과 바닥의 재질 변화를 함께 고려한 열 환경개선 효과를 평가하지 못하였다. 애초에 완충녹지 조성에 초점 맞춰졌으나 더 효과적인 열 쾌적성을 향상하기 위해 공간적 변화 및 재질의 조합을 통

해 평가하지 못한 점은 아쉬움으로 남는다. 마지막으로 완충 녹지 조성에 있어 실제 설계기준을 상세하게 반영하지 못하였고 완충녹지 폭을 더 다양하게 조성하여 비교하지 못한 아쉬움이 있다. 따라서 열 환경 측면에서 다양한 폭과 식재 패턴 변화 또는 조합을 통해 열 쾌적성 개선 효과를 평가하여 완충녹지의 질적 효과를 높이는 최적의 완충녹지 조성 기준을 마련하는 연구가 필요할 것으로 보인다.

그럼에도 본 연구는 실측을 통해 실제 대상지의 기상자료를 측정하여 보행자 수준에서 미기후 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확보하였고 인공 배열 방출이 높은 노후 공단에 인접한 취약 주거지역을 대상으로 열 쾌적성 개선 효과를 평가하였음에 의의가 있다.

감사의 글

본 연구는 박종화, 2019. Thermal inequity in urban heat island: Vulnerable class near the industrial area. 박사학위논문, UNIST의 내용 일부를 수정·보완한 것입니다.

참고문헌

- [1] E. J. Kim, and H. Kim, “Effect modification of individual-and regional-scale characteristics on heat wave-related mortality rates between 2009 and 2012 in Seoul, South Korea”, *Science of The Total Environment*, vol. 595, pp. 141-148, October 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.248>
- [2] W. S. Lee, S. G. Jung, K. H. Park, and K. T. Kim, “Analysis of Urban Thermal Environment for Environment-Friendly Spatial Plan” *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, vol. 13 no. 1, pp. 142-154, March 2010. <https://doi.org/10.11108/kagis.2010.13.1.142>
- [3] Y.S. Lee, S. W. Lee, J. H. Im, and C. H. Yoo, “Analysis of Surface Urban Heat Island and Land Surface Temperature Using Deep Learning Based Local Climate Zone Classification: A Case Study of Suwon and Daegu, Korea”, *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 37(5-3), pp. 1447-1460, October 2021.
<https://doi.org/10.7780/kjrs.2021.37.5.3.9>
- [4] J. S. Kim, D. K. Lee, S. Y. Sung, S. G. Jeong, and J. H. Park, “Study of vulnerable district characteristics on urban heat island according to land use using normalized index : Focused on Daegu Metropolitan City residential district”, *Journal of Korea Planners Association* vol. 50, no. 5, pp. 59-72, August 2015.
<https://doi.org/10.17208/jkpa.2015.08.50.5.59>
- [5] O. Rotem-Mindali, Y. Michael, D. Helman, and I. M. Lensky, “The role of local land-use on the urban heat island effect of Tel Aviv as assessed from satellite remote sensing”, *Applied Geography*, vol. 56, pp. 145-153, January 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.023>
- [6] S. D. Chakraborty, Y. Kant, and D. Mitra, “Assessment of land surface temperature and heat fluxes over Delhi using remote sensing data”, *Journal of environmental management*, vol. 148, pp. 143-152, January 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.034>
- [7] H. Fan, and D. J. Sailor, “Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes”, *Atmospheric environment*, vol. 39, no. 1, pp. 73-84, January 2015. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.031>
- [8] H. Y. Moon, D. P. Kim, Y. D. Gweon, H. B. Park, “Ventilation Corridor Characteristics Analysis and Management Strategy to Improve Urban Thermal Environment - A Case Study of the Busan, South Korea-”, *Korean Journal of environment and ecolog*, vol. 35, no. 6, pp. 659-668, Dec. 2021.
<https://doi.org/10.13047/KJEE.2021.35.6.659>
- [9] K. M. Koo, A Study on the Residential Environment Status and Recycling Business Implementation Plan of Dwellings in the Nearby Older Industrial Complex- With Focus on dwellings in the Vicinity of Sasang Industrial District in Busan City, Master’s thesis, Department of Real Estate Studies The Graduate School Pusan National University, pp. 7-8, 2015.
- [10] Y. Choi, and B. H. Lee, “A Study on the Estimation of Land Price Considering Characteristic of the Adjacent Land Use and Spatial Autocorrelation in Residential Zone”, *Journal of Korea Planning Association*, vol.41, no. 5, pp. 45-60, October 2006. G704-000338.2006.41.5.008
- [11] F. De Vor, and H. L. De Groot, “The impact of industrial sites on residential property values: A hedonic pricing analysis from the Netherlands”, *Regional Studies*, vol. 45, no. 5, pp. 609-623, May 2011.
<https://doi.org/10.1080/00343401003601925>
- [12] S. H. Jeong, and S. C. Ko, “Spatial Impacts of Industrial Complex Development on Residential Amenities in Neighboring Community: the Case of Siwha New Town in Korea”, *Modern Society and Public Administration*, vol. 21, no. 1, pp. 49-69, April 2011.
- [13] J. Y. Kim, G. H. Lee, and S. J. Baek, “A Study on the Standards of Parks and Green Spaces in Industrial Complex Structure Advancement Project”, *The Korea Spatial Planning Review*, 67-81, June 2013.
<https://doi.org/10.15793/kspr.2013.77..005>

- [14] Y. B. Song, "Effect of Green Buffer Zone in Reducing Gaseous Air Pollutants in the Shiwha Industrial Area", *The Korean Institute of Landscape Architecture*, vol. 33, no. 6, pp. 90-97, February 2006.
- [15] S. J. Jo, and H. M. Kim "Evaluation of Green Buffer Zone Supplement Plan for Air Pollution Decrease Function - In The Case of Sihwa Industrial Complex Green Buffer Zone", *Journal of Korea society of environmental administration*, vol. 15, no. 3, pp. 145-154, September 2009.
- [16] S. Y. Yoo, S. Choi, N. Koo, T. Kim, C. R. Park, and W. H. Park, "A 10-year Analysis on the Reduction of Particulate Matter at the Green Buffer of the Sihwa Industrial Complex", *Sustainability*, vol. 13, no. 10, 5538, May 2021. <https://doi.org/10.3390/su13105538>
- [17] N. Abdollahzadeh, and N. Biloria, "Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney", *Frontiers of Architectural Research*, vol. 10, no. 2, pp. 394-409, June 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.11.006>
- [18] J. A. Acero, and K. Herranz-Pascual, "A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques", *Building and Environment*, vol. 93, pp. 245-257, November 2015, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.028>
- [19] D. Lai, W. Liu, T. Gan, K. Liu, and Q. Chen, "A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces", *Science of the Total Environment*, vol. 661, pp. 337-353, April 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>
- [20] Y. N. Ayyad, and S. Sharples, "Envi-MET validation and sensitivity analysis using field measurements in a hot arid climate", *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 329, 012040, September 2019, doi.org/10.1088/1755-1315/329/1/012040
- [21] A. Matzarakis, H. Mayer, and M. G. Iziomon, "Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International journal of biometeorology*, vol. 43, no. 2, pp. 76-84, October 1999. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>
- [22] H. Mayer, J. Holst, P. Dostal, F. Imbery, and D. Schindler, "Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe", *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 17(3), pp. 241-250, July 2008. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0285>
- [23] C. Ketterer, and A. Matzarakis, "Human biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany", *Landscape and Urban Planning*, vol. 122, pp. 78-88, February 2014. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.003>
- [24] B. Abdi, A. Hami, and D. Zarehaghi, "Impact of small-scale tree planting patterns on outdoor cooling and thermal comfort", *Sustainable Cities and Society*, vol. 56, May 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102085>
- [25] E. Gatto, R. Buccolieri, E. Aarvevaara, F. Ippolito, R. Emmanuel, L. Perronace, and J. L. Santiago, "Impact of urban vegetation on outdoor thermal comfort: Comparison between a mediterranean city (Lecce, Italy) and a northern European city (Lahti, Finland)", *Forests*, vol. 11, no. 2, February 2020. <https://doi.org/10.3390/f11020228>
- [26] H. Lee, H. Mayer, and L. Chen, "Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany", *landscape and urban planning*, vol. 148, pp. 37-50, April 2016. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.00>
- [27] G. W. Mun, S. G. Jeong, G. H. Park, B. G. Song, C. G. Jang, and J. Y. Sin, "An Analysis of the Effect of Urban Greening on the Improvement of Thermal Comfort", *The Korean Institute of Landscape Architecture*, In Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference, Korea, pp. 73-74, 2015.
- [28] F. Laureti, and A. Battisti, "Mitigation technologies for counteracting the UHI effects and for improving outdoor thermal comfort in mediterranean urban open spaces: a study of vegetation and cool materials effects on pedestrian comfort in Rome", *International Conference on Urban Comfort and Environmental Quality*, University of Genoa, Italy, 122, September 2017.
- [29] M. Taleghani, and U. Berardi, "The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto", *Urban climate*, vol. 24, pp. 449-459, June 2018, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.007>
- [30] J. S. Kim, and S. H. Lee, "An Analysis of the Effect of Urban Thermal Environment Improvement on the Change of Urban Surface Properties using ENVI-met", *The Korean Environmental Sciences Society*, In Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference, Korea, pp. 76-76, 2020.
- [31] D. J. Kim, H. K. Kim, S. G. Oh, and J. M. Kang, "Evaluation of Microclimate Condition and Thermal Comfort in Pedestrian-level Environment of a Remodeled Apartment Complex", *Journal of The Urban Design Institute of Korea*, vol. 19(3), pp. 33-46, June 2018. <https://doi.org/10.38195/judik.2018.06.19.3.33>
- [32] Y. J. Kwon, D. K. Lee, and S. K. Ahn. "Urban Street Planting Scenarios Simulation for Micro-scale Urban Heat Island Effect Mitigation in Seoul", *J. Environ. Impact Assess*, vol. 28(1), pp. 23-34, February 2019.

- <https://doi.org/10.14249/eia.2019.28.1.23>
- [33] E. H. Kim, and H. K. Kim, "Improving Thermal Environment and Thermal Comfort by Modifying Paving and Planting of a Covered Parking Lot - Focusing on Mansu Public Parking Lot in Namdong-gu, Incheon", *Journal of The Urban Design Insitute of Korea*, vol. 21, no. 2, pp. 117-131, April 2020.
<https://doi.org/10.38195/judik.2020.04.21.2.117>
- [34] S. H. Hong, R. Y. Kang, M. Y. An, J. S. Kim, and E. S. Jung, "Study on the Impact of Roadside Forests on Particulate Matter between Road and Public Openspace in front of Building Site - Case of Openspace of Busan City hall in Korea", *Korean Journal of Environment and Ecology*, vol. 32(3), pp. 323-331, June 2018.
<https://doi.org/10.13047/KJEE.2018.32.3.323>
- [35] K.I. Hwang, B. H. Han, J. I. Kwak, and S. C. Park, "A Study on Decreasing Effects of Ultra-fine Particles (PM2.5) by Structures in a Roadside Buffer Green - A Buffer Green in Songpa-gu, Seoul -", *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, vol. 46, no. 4, pp. 61-75, August 2018.
<https://doi.org/10.9715/KILA.2018.46.4.061>
- [36] D. E. Bowler, L. Buyung-Ali, T. M. Knight, and A. S. Pullin, "Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence" *Landscape and urban planning*, vol. 97, no. 3, pp. 147-155, September 2010. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- [37] Y. Wang, F. Bakker, R. De Groot, and H. Wörtche, "Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: A literature review", *Building and environment*, vol. 77, pp. 88-100, July 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.021>
- [38] Koc, C. B., Osmond, P., & Peters, A. (2018). Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Solar Energy*, 166, 486-508.
- [39] W. Ouyang, T. E. Morakinyo, C. Ren, and E. Ng, "The cooling efficiency of variable greenery coverage ratios in different urban densities: A study in a subtropical climate", *Building and Environment*, vol. 174, May 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106772>
- [40] Z. Tan, K. K. L. Lau, and E. Ng, "Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment", *Energy and Buildings*, vol. 114, pp. 265-274, February 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.031>
- [41] A. Ghaffarianhoseini, U. Berardi, and A. Ghaffarianhoseini, "Thermal performance characteristics of unshaded courtyards in hot and humid climates", *Building and Environment*, vol. 87, pp. 154-168, May 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.001>
- [42] G. Lobaccaro, and J. A. Acero, "Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons", *Urban Climate*, vol. 14, pp. 251-267, Dec. 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.002>
- [43] J. H. Park, and G. H. Cho, "Examining the association between physical characteristics of green space and land surface temperature: a case study of Ulsan, Korea", *Sustainability*, vol. 8, no. 8, August 2016.
<https://doi.org/10.3390/su8080777>
- [44] S. Huttner, and M. Bruse, "Numerical modeling of the urban climate? a preview on ENVI- met 4.0", *ICUC-7*, In 7th International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japan. September 2015.
- [45] I. McRae, F. Freedman, A. Rivera, X. Li, J. Dou, I. Cruz, and R. Bornstein, "Integration of the WUDAPT, WRF, and ENVI-met models to simulate extreme daytime temperature mitigation strategies in San Jose, California. *Building and Environment*, vol. 184, October 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107180>
- [46] S. Thorsson, F. Lindberg, I. Eliasson, and B. Holmer, "Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting", *International journal of climatology*, vol. 27, no. 24, pp. 1983-1993, October 2007. <https://doi.org/10.1002/joc.1537>
- [47] HOBO data logger. Projects[Internet]. Available: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/weather-stations/>.
- [48] E. K. Rhee, M. S. Chae, and J. C. Park, "A Study on the Energy Conservation Strategies in Factory Building," *Journal of the architectural institute of Korea planning & design*, vol. 28, no. 1, pp. 253-262, January 2012, doi:10.5659/JAIK_PD.2012.28.1.253
- [49] F. Lindberg, B. Holmer, and S. Thorsson, "SOLWEIG 1.0-Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings", *International journal of biometeorology*, 52(7), 697-713, June 2008. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>
- [50] P. Hoppe, "The physiological equivalent temperature a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment", *International journal of Biometeorology*, vol. 43, no. 2, pp. 71-75, October 1999.
<https://doi.org/10.1007/s004840050118>
- [51] D. H. Kang, C. H. Choi, and S. G. Jung, "Development of Thermal Comfort Evaluation Map by the Land Cover in

- Yeongnam Region”, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, vol. 17, no. 2, pp. 136-155, Jun. 2014. doi: 10.11108/KAGIS.2014.17.2.136
- [52] Y. W. Na, B. G. Choi, J. W. Jung, “A Study on the Green Buffer Zone Composition of Incheon Industrial Area Using Spatial Information” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE 2016 CONVENTION, Korea, pp. 3-4, Oct. 2016.
- [53] X. Yang, L. Zhao, M. Bruse, and Q. Meng, “Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces”, *Building and Environment*, vol. 0, pp. 3-104, February 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.008>
- [54] J. N. Georgi, and D. Dimitriou, “The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities: Case study of Chania, Greece”, *Building and Environment*, vol. 45, no. 6, pp. 1401-1414, June 2010,
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.12.003>
- [55] S. Oliveira, H. Andrade, and T. Vaz, “The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon”, *Building and Environment*, vol. 46, no. 11, pp. 2186-2194, Nov. 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.034>
- [56] B. A. Norton, A. M. Coutts, S. J. Livesley, R. J. Harris, A. M. Hunter, and N. S. Williams, “Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes”, *Landscape and Urban Planning*, vol. 134, pp. 127-138, February 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- [57] C. Zhu, P. Ji, and S. Li, “Effects of urban green belts on the air temperature, humidity and air quality”, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 25, no. 1, pp. 39-55, March 2017. <https://doi.org/10.3846/16486897.2016.1194276>



박종화(Jong-Hwa Park)

2019년 : UNIST 대학원(공학박사-도시공학)

2019년~2021년: LH토지주택연구원 선임연구원

2021년~현 재: 국토연구원 부연구위원

※ 관심분야 : 기후변화 대응, 탄소중립, GIS