

공동주택단지의 물리적 배치변경이 도시 열쾌적성에 미치는 영향***

- 서울시 압구정 아파트지구를 중심으로 -

The Effects of Changes in the Physical Layout of Apartment Complexes on the Thermal Comfort Index in Urban Area

- Focusing on Apgujeong Apartment Complex -

Kim, Hwan-Sung **김 환 성** ** 정회원, 홍익대학교 도시계획학과 박사과정

Kim, Hyungkyoo **김 형 규** 정회원, 홍익대학교 도시공학전공 조교수

Lee, Jae Seung **이 제 승** * 정회원, 서울대학교 환경대학원 부교수

Abstract: The high temperature and poor thermal comfort in urban areas increase various health diseases and threatened health of citizens. There have been attempts to mitigate these problems through changes in urban forms like layout of buildings. However, few studies investigated the effects of changes in physical layout of apartment complexes on thermal comfort levels that residents feel heat stress. This study compares the effects of three physical arrangements of apartment complexes on the thermal comfort through simulation of three ENVI-met models with different building types and arrangements of buildings for the Apgujeong Hyundai Apartment in Seoul, Korea. The result of this study indicates that the change in the layout of apartment complexes brought significant changes to wind and heat environment. Also, the current layout of the Apgujeong Hyundai Apartment is very disadvantageous in improving the thermal comfort inside the complex. This result calls for a planned building layout that considers the improvement of thermal comfort is required. Finally, this study suggests detailed step-by-step guidance and expansion of domestic policies for mitigating climate problems.

Keywords: Climate Change, Urban Form, ENVI-met, PET, UTCI
기후변화, 도시형태, ENVI-met, PET, UTCI

1. 서론

1.1 연구의 배경과 목적

오늘날 현대사회의 도시지역은 급격한 도시화에 따른 도시인구의 증가, 인공피복 면적의 증가, 건축물의 고밀화 등으로 인해 다양한 기후 문제가 발생하고 있다. 산업, 발전(發電), 교통 및 물류와 같은 인간 활동 과정에서 발생하는 배출가스에는 지구온난화, 도시 열섬현상 등을 유발하는 온실가스가 포함되어 있으며,¹⁾ 이로 인해 도시지역의 열섬현상 및 여름철 이상고온 현상이 빈번하게 발생하게 된다.

이러한 현상은 우리나라의 도시지역에서도 나타나고 있다. 2016년 기준 서울의 면적은 대한민국 전체면적의 0.6%에 불과하지만 거주하고 있는 인구수는 전 국민의 19%를 차지하고 있으며, 동아시아에서 가장 인구밀도가 높은 도시 중 하나이다. 서울의 연평균 기온은 2012년부터 2016년까지, 연간 최고기온은 2013년부터 2016년까지 지속적으로 상승하여 각각 1.4℃, 2.7℃ 상승하였다. 이후 서울의 연평균 기온은 하락세를 보이나, 2018년 서울의 최고기온은 39.6℃를 기록하며 기상청 관측 이후 최고치를 경신했다<그림 1>.

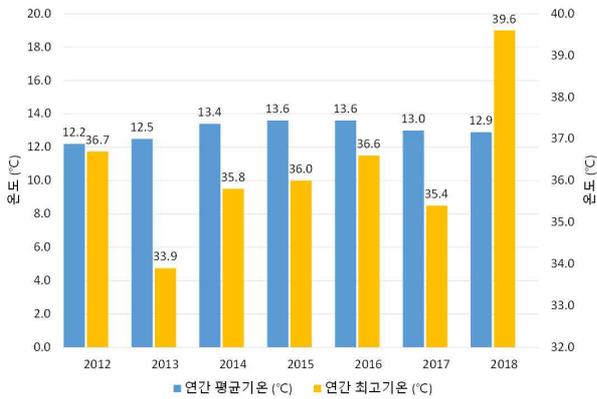
이러한 도시지역의 여름철 이상고온과 같은 기후 변화는 도시 거주민들의 열 스트레스 및 각종 온열질환을 발생시킬 수 있다. 2017년 세계경제포럼(World Economic Forum)은 여름철 이상고온과 같은 극한의 날씨 상태를 높은 발생가능성과 위험도를 지닌 위협요인으로 분류하였으며, 인간이 장시간 이상고온에 노출될 경우 체온상승, 피부 건조, 현기증, 호흡곤란 같은 증상이 발현되며 일사·열사병 등의 온열 질환이 발생할 수 있다.

* 교신저자(Corresponding Author) : jaeseung74@gmail.com

** 이 연구는 홍익대학교 도시계획과 김환성의 박사학위 논문 바탕으로 작성되었음.

*** 이 연구는 서울대학교 신임교수 연구정착금으로 지원되는 연구비에 의하여 수행되었으며, 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2017R1D1A1B03032234).

1) Chae, Y. Co-benefit analysis of an air quality management plan and greenhouse gas reduction strategies in the Seoul metropolitan area. Environmental Science & Policy. 13. 2010. pp.205 - 216.



<그림 1> 서울시 연도별 연간 평균기온 및 최고기온

또한, 여름철 이상고온과 같은 기후 문제가 악화될 경우 환기 및 냉방을 위한 에너지 소비량이 증가하게 되고,²⁾ 늘어난 전력수요량으로 인해 다시금 발전(發電) 과정에서 온실가스가 배출됨으로써 악순환으로 이어질 수 있다.

도시지역의 기후변화 문제를 개선할 수 있는 전략으로는 도시 형태를 변화시키는 방법이 있다. 이와 관련된 선행연구들은 건축물의 형태, 배치, 높이 및 크기를 변화시키거나,³⁾ 가로의 주변 건물 높이와 폭의 비율 (H/W), 오픈스페이스 조성 등의 변화를 통하여 바람환경, 음영 등의 변화와 이에 따른 기후 변화를 측정하고 있다.⁴⁾ 또한, 도시 형태 조건 변화에 따른 대상지의 기후 변화를 미기상 모델 프로그램을 통해 시뮬레이션함으로써 열쾌적성 개선을 위한 다양한 대안을 비교분석 하고 있다.⁵⁾

오늘날 도시지역의 여름철 이상고온 등과 같은 기후 변화 문제에 대한 정책은 대부분 온실가스 배출원인의 규명 과 통제에 초점이 맞추어져 있으며, 선행연구 또한 이 같은 정책 효과의 실증적인 연구가 대부분이다.

본 연구는 도시 형태의 변화가 단지의 열쾌적성에 영향을 미칠 것이라는 가설을 토대로 공동주택단지의 물리적

배치변경이 대상지의 바람 환경, 열 환경, 그리고 열쾌적성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

1.2 연구대상 및 범위

본 연구의 범위는 최근 재개발 논의가 진행되고 있는 한강 변 아파트 중 압구정동 현대아파트를 대상으로 한다. 서울의 여름철 최고기온은 7월, 8월에 나타나며, 대상지가 속해 있는 강남구는 인접한 송파구, 서초구와 함께 매년 여름철의 높은 평균기온, 최고기온을 기록하고 있으며, 2017년에는 서초구와 함께 서울에서 가장 열섬현상이 두드러지게 나타났다. 즉, 연구 대상지는 여름철 이상고온과 같은 기후 변화 문제가 뚜렷하게 발생하는 지역으로서 열쾌적성의 개선 효과가 명확하게 나타날 것으로 판단된다.

또한, 대상지는 서울 중심부의 한강 변에 있다는 입지적 특성을 지니고 있다. 한강과 같은 도시의 수변공간은 도시 외부의 차갑고 맑은 공기를 유입시키거나 도시지역에서 발생한 뜨겁고 오염된 공기를 배출하는 환기통로 역할을 한다. 따라서 압구정 현대 아파트 단지를 대상으로 본 연구의 결과가 적용될 경우, 대상지 인근에 한정된 국지적인 열쾌적성의 개선뿐만 아니라 서울 전체의 열쾌적성의 개선에도 영향을 미칠 수 있다는 기대효과를 지니고 있다.

또한, 도시 형태 요소 중에서도 건축물과 같은 콘크리트 구조물은 그 물리적·사회적 특성상 단기간 내에 변화시키기가 어렵다. 하지만 대상지는 재건축 논의가 활발히 진행 중이기 때문에, 근시일 안에 통상적으로는 실현하기 어려운 건축물의 배치 변경이 가능하게 될 것이다. 본 연구의 결과가 대상지의 재건축 계획단계에 적용될 경우, 해당 지역의 기후 변화 문제를 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

연구 방법은 미기상 모델인 ENVI-met의 시뮬레이션으로 서로 다른 세 가지 배치계획안을 통해 풍속, 온도 및 열쾌적성 지표의 변화를 관찰하고 열쾌적성의 개선 여부를 확인하고자 한다. 세 가지 배치계획안 중 열쾌적성 개선에 유리한 모델을 선정하고, 해당 모델이 지닌 물리적 특성이 무엇인지를 파악함으로써 향후 도시기후문제 완화를 위해 개발 및 계획 단계에서 고려해야 할 지침과 정책의 확대 및 구체적인 방안 등을 제안하고자 한다.

2. 이론 및 선행연구 고찰

2.1 도시 형태 (Urban Form)

도시 형태에 대한 정의는 다양한 연구자들에 의해 정의되어 왔다. Kevin Lynch(1981)는 도시 형태를 공간 활용의 관점에서 고려할 때, 인간 활동에 의한 공간, 영역, 경로 등의 변화에 주목하였으며 수정된 물리적 형태를 공간과 인지의 영역으로 분석하였다.⁶⁾ Bill Hillier(1996)의 경우 도시

6) Lynch, K. Good city form. MIT Press: Cambridge. MA. 1981.

2) Johansson, E., Emmanuel, R. The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. International Journal of Biometeorology. 51(2). 2006. pp.119-133.

3) 1. Nordstrom, K.F., Jackson, N.L. Effects of a high rise building on wind flow and beach characteristics at Atlantic City, NJ, USA. Ocean & Coastal Management. 39. 1998. pp.245-263.

2. Kanda, M. Large-Eddy Simulations on the Effects of Surface Geometry of Building Arrays on Turbulent Organized Structures. Boundary-Layer Meteorol. 118. 2006. pp.151-168.

3. Hagishima, A., Tanimoto, J., Nagayama, K., Meno, S. Aerodynamic Parameters of Regular Arrays of Rectangular Blocks with Various Geometries. Boundary-Layer Meteorol. 132. 2009. pp.315-337.

4) Givoni, B. Climate Considerations in Building and Urban Design. John Wiley & Sons: New York. NY. 1998.

5) 1. Middel, A., Häb, K., Brazel, A.J., Martin, C.A., Guhathakurta, S. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. Landscape and Urban Planning. 122. 2014. pp.16-28.

2. Jin, H., Liu, Z., Jin, Y., Kang, J., Liu, J. The Effects of Residential Area Building Layout on Outdoor Wind Environment at the Pedestrian Level in Severe Cold Regions of China. Sustainability. 9. 2017. p.2310.

형태는 전체 구조 내에서 주어진 공간 위치를 명확하게 참조하는 공간 배치로 정의한다.⁷⁾ 이는 공간 및 물리적 형태, 공간의 사용과 점유 그리고 인지의 개념을 포함하고 있다. Gianfranco Caniggia와 Gian Luigi Maffei(2001)는 도시 형태가 도시의 세부구조와 역사·문화의 변화로 형성된 결과라고 정의하고 있으며, 이 과정에서 ‘물리적 형태’, ‘기능 및 사용’, ‘건축물 형태’, ‘건설 및 수정 행위’와 같은 요소에 주목하며, 현재의 도시 형태는 이전의 건축, 도시에 대한 경험과 문화 개념의 공유 및 파생으로 형성된다고 말한다.⁸⁾ Michael Batty(2007)는 도시 형태를 공간 분석적 접근을 통해 정의하고자 하였으며, ‘토지이용의 변화, 성장 및 분리’, ‘인간의 이동’을 통해 결정되는 공간 분포로써 정의한다.⁹⁾

전술한 도시 형태에 대한 정의가 지니는 공통적인 속성을 정리하자면, 도시 형태는 인간의 활동이나 공간 활용을 위해 형성되며, 문화적 특성이 반영되는 물리적 구조라고 할 수 있으며, 시간의 흐름이나 문화의 변화에 따라 변화 가능한 특성을 지니고 있다고 할 수 있다. 이에 따라 본 연구는 도시 형태를 ‘인간의 활동 및 활용을 위해 배치되는 변화 가능한 물리적 형태’로 정의하고자 한다.

2.2 선행연구 고찰

(1) 도시 형태 변화와 열쾌적성의 변화에 관한 연구

본 연구는 공동주택단지의 물리적 배치변경과 같은 도시 형태의 변화가 대상지의 PET, UTCI와 같은 열쾌적성에 미치는 영향을 관찰하고자 한다. 이처럼 도시 형태에 따른 열쾌적성의 변화에 관한 연구는 다음과 같다.

Johansson과 Emmanuel은 도시 형태와 식재, 보행자 전용 아케이드 등의 변화를 통한 음지의 형성이 PET를 통해 관찰된 열쾌적성의 개선에 도움이 되는 것을 확인했다.¹⁰⁾ 정다인은 보행로의 공간 특성에 따른 열쾌적성을 비교하고, 이에 영향을 미치는 요인으로 건물 및 식재에 의한 차양효과를 확인하였으며, 식재의 높이 및 수관폭을 고려한 계획을 통해 대상지의 열쾌적성을 개선할 수 있음을 확인하였다.¹¹⁾ Shashua-Bar와 Pearlmutter는 도시 피복의 변화가 열쾌적성에 미치는 영향을 조사하였으며, 분석 결과 포장도로나 일반 토양보다 녹지 피복의 열쾌적성 개선 효과가 더 뛰어난 것을 확인하였다.¹²⁾ 박종훈은 블록 단위에서 녹지면적

과 대기온도 감소의 상관관계에 관해 연구하였으며, 녹지가 증가함에 따라 대기온도가 감소하는 것을 확인하였다.¹³⁾ 손영훈은 도시의 가로 공간을 대상으로 피복의 재료 변화 및 녹화 등에 따른 열 환경 변화를 분석하였다.¹⁴⁾ 또한, 가로수 식재를 통해 보행로의 일사량을 줄이고 피복 재료의 변경으로 열 환경을 개선할 수 있음을 확인하였다.

(2) 선행연구 고찰 및 기존연구와의 차별성

도시 형태 변화에 따른 열쾌적성에 관한 연구들은 대다수가 건축물 표면 및 지표면의 재질 변화, 식재 및 녹지면적의 변화, 도시 형태에 따른 음영지역의 분포 등 열에너지의 흡수 및 반사에 따른 열쾌적성 변화를 관찰하고 있으며,¹⁵⁾ 건축물 형태나 배치변경이 대상지의 열쾌적성의 변화에 미치는 영향에 관한 연구는 상대적으로 부족했다.

도시지역의 기후변화 문제, 열 질환 및 질병 발생의 감소, 사회적 비용을 줄이기 위해서는 도시형태 변화를 통한 열쾌적성 개선에 관한 연구가 필요하기에 본 연구는 선행연구와 차별성을 지닌다.

3. 분석의 틀

3.1 연구 범위

본 연구에서는 서울 한강 변의 대표적인 대규모 공동주택단지인 서울시 강남구의 압구정 현대아파트 단지 중 지구단위계획구역 제3 특별계획구역 연구 대상으로 선정하였다<그림 2>.

총면적은 약 401,425㎡, 구역 내 1~7차 아파트 단지외 10, 13, 14차 아파트 단지로 구성되며, 총 50개 동의 건축물에 3,840세대가 거주하고 있는 복합 아파트 단지이다. 14~16층 높이의 판상형 건축물들로만 배치되었으며, 대부분의 주동배치가 평행하게 정렬되어 있으나, 대상지 북서쪽에 있는 건축물들은 중정형으로 배치되어 있다.

13) 박종훈. 도시블록 단위에서 소규모 녹지가 기온저감에 미치는 효과. 서울대학교 공학박사학위논문. 2013.

14) 손영훈. 도시가로공간 열환경 개선기법에 관한 연구. 계명대학교 대학원 석사학위논문. 2019.

15) 1. Panferov, O., Knyazikhin, Y., Myneni, R. B., Szarzynski, J., Engwald, S., Schnitzler, K. G., Gravenhorst, G. The role of canopy structure in the spectral variation of transmission and absorption of solar radiation in vegetation canopies. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 39(2). 2001. pp.241 - 253.

2. Streiling, S., Matzarakis, A. Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city: a case study. Journal of Arboriculture. 29(6). 2003. pp.309 - 316.

3. Huang, J., Wang, R., Li, F., Yang, W., Zhou, C., Jin, J., & Shi, Y. Simulation of thermal effects due to different amounts of urban vegetation within the built-up area of Beijing, China. International Journal of Sustainable Development & World Ecology. 16(1). 2009, pp.67 - 76.

4. Santamouris, M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 26. 2013. pp.224 - 240.

7) Hillier, B. Space is the machine. Cambridge University Press: Cambridge. 1996.

8) Caniggia, G. · Maffei, G. L. Architectural composition and building typology: interpreting basic building. Alinea. Florence. 2001.

9) Batty, M. Cities and complexity. MIT Press: Cambridge. MA. 2007.

10) Johansson, E., Emmanuel, R. The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. International Journal of Biometeorology. 51(2). 2006. pp.119-133.

11) 정다인. 현장측정과 미기상모델링을 활용한 옥외공간의 열쾌적성 비교, 창원대학교 석사학위논문. 2016.

12) Shashua Bar, L., Pearlmutter, D., Erell, E. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. International Journal of Climatology. 31. 2011. pp.1498-1506.



<그림 2> 연구 대상지 위치

내부의 주요한 오픈스페이스로는 대상지 중앙부에 있는 압구정 초등학교 운동장과 압구정 은행공원, 대상지 동남쪽에 있는 압구정 중학교와 압구정 고등학교의 운동장이 존재한다.

3.2 분석을 위한 배치계획안

본 연구는 전술한 가설을 토대로 공동주택단지의 물리적 배치변경이 대상지의 바람 환경과 열 환경에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 서로 다른 세 가지 배치계획안 <그림 3~5>을 미기상 모델 시뮬레이션을 통해 풍속, 온도 및 열쾌적성 지표의 변화를 관찰하고 외부환기성과 열쾌적성의 개선 여부를 확인하고자 한다.

압구정 현대 아파트 단지의 현재 배치 <그림 3>는 14층~16층 사이의 판상형 건축물이 주를 이루고 있다. 한강변을 따라 배치된 대상지 북쪽의 건축물들은 도로 경계를 따라 중정형 배치를 이루고 있으며, 대상지 서쪽의 건축물들 역시 마찬가지로 판상형 건축물에 의한 중정형으로 배치되어 있다. 대상지의 중앙과 남동쪽에 아파트 건축물들은 남향으로 나란히 정렬되어 있다.

한편, 서울시는 2007년 당시 한강 수변 지역의 공공성을 위한 재편계획이라는 명목 아래 합정, 여의도, 이촌, 성수와 함께 압구정의 해당 대상지 일대를 전략정비구역으로 선정하였고 이에 대한 계획안으로 <그림 4>와 같은 고층의 탑상형 건축물과 저층 판상형 건축물이 혼재되어 있는 배치계획안을 제안하였다. 45~50층의 탑상형 건축물의 배치가 주를 이루기 때문에 상대적으로 인동간격이 증가하였으며, 한강 변으로부터 북측의 건축물까지의 거리가 확장되었다. 하지만 서울시와 주민의 갈등으로 인해 사업이 진행되지 못하고 2013년 8월 전략정비구역에서 해제되었다.

2016년 10월 서울시는 압구정아파트지구 지구단위계획구역 및 계획 결정 안을 통하여 <그림 5>와 같은 건축물 배치계획안을 발표하였다. 대상지 남쪽의 준주거 용지와 북쪽 한강 변에 수변 문화공원 녹지공간이 계획되었고, 이를 연결하는 폭 25m가량의 보행 및 도로축이 설정되었다. 건

축물은 해당 축을 기준으로 좌우 대칭에 가깝게 배치되며, 12~16층 사이의 판상형 건축물과 30~40층 사이의 탑상형 건축물이 U자 형태로 배치되는 것이 특징이다.



<그림 3> 연구 대상지 현황



<그림 4> 2007년 압구정 전략정비구역 마스터플랜



<그림 5> 2016년 지구단위계획 상의 건축물 디자인 이미지

3.3 열쾌적성 (Thermal Comfort)

열쾌적성이란 특정한 열 환경에 대한 심리적 만족감을 의미하며, 개인의 활동 수준, 의복 및 습도 등 다양한 요인이 영향을 미친다. 더 나아가 주거단지에서의 열쾌적성이란 거주민의 주거환경에 대한 만족감을 의미하며, 일반적으로 주민의 80% 이상이 만족하는 상태를 의미한다.

이러한 심리상태를 수치화하기 위한 다양한 지표들이 존재하며, 공간에서의 온도, 상대습도, 풍속, 일사량 등이 인체를 대상으로 흡수·방출되는 에너지량의 정량적 계산을 통해 수치화된다. 대표적인 열쾌적성 지표로는 MRT(Mean Radiant

Temperature), PMV (Predicted Mean Vote), PET(Physiologically Equivalent Temperature), UTCI (Universal Thermal Climate Index) 등이 있으며, 이 중 도시계획 및 조경 분야에서는 PET와 UTCI가 높은 빈도로 사용되고 있다.¹⁶⁾

(1) PET (Physiologically Equivalent Temperature)

PET는 독일의 Höppe에 의해 제안되었으며, 주로 외부 열쾌적성의 측정에 사용된다.¹⁷⁾ 실외공간에서의 기온, 풍속, 상대습도, 태양복사에너지 등의 고려와 네 가지의 기상 파라미터(대기 온도, 평균복사온도, 풍속, 상대습도)와 두 가지의 열 생리학적 파라미터(의류의 열 저항, 인간의 활동수준)가 고려됨으로써 인체가 흡수·방출하는 에너지의 정량적인 계산을 통해 인간이 느끼는 열 환경에 대한 스트레스를 단계별로 나타낸 것이다. 18~23도의 범위에서 최상의 쾌적함을 나타내며, 이후 일정 단계별로 인간이 느끼는 열 인지 단계가 변화한다<표 1>.

PET는 다음의 열 균형 방정식을 기반으로 한 생리학적인 열 균형 모델(MEM1)을 사용한다.

$$S + W + R + M + E_{RE} + E_D + E_{SW} = 0 \quad (1)$$

이때 S는 체열 저장량, W는 물리적 작업 출력, R은 신체의 순 복사에너지, M은 신진대사율, C는 대류 열의 흐름을 나타내며, E_{RE}는 모든 열의 흐름, E_D는 신체 피부를 통해 확산하는 수분 증발을 위한 잠열의 흐름, 그리고 E_{SW}는 땀의 증발로 인한 잠열의 흐름을 의미한다.

(2) UTCI (Universal Thermal Climate Index)

2001년 국제생명기상학회(International Society of Biometeorology)에 의해 개발되었으며, 기온, 풍속, 상대습도, 일사량 등의 실외조건과 인체 대사량, 착의량, 개인특성 등을 측정하여 인간의 열 스트레스 상태를 나타낸다. UTCI는 기상 및 비기상에 대해 다음과 같은 조건을 가진다. 지표면으로부터 10m 높이에서의 풍속은 약 0.5m/s, 대기온도와 동일한 평균복사온도를 지니며, 인간의 활동특성은 시속 4km로 걸음걸이를 가지며 이는 약 135W/m²의 대사율을 제공한다. +9~+26도의 범위에서 최상의 쾌적함을 나타내며, 이후 단계별로 인간이 느끼는 열 인지 단계가 변화한다<표 1>.¹⁸⁾

<표 1> 열쾌적성 지표에 따른 열 인지 단계

열 인지 단계	지수 범위	
	PET (°C)	UTCI (°C)
Very cold (extreme cold stress)	< 4	< -40
(Very strong cold stress)		-40 to -27
Cold (strong and stress)	4~8	-27 to -13
Cool (moderate cold stress)	8~13	-13 to 0
Slightly cool (slight cold stress)	13~18	0 to +9
Comfortable (no thermal stress)	18~23	+9 to +26
Slightly warm (slight heat stress)	23~29	
Warm (moderate heat stress)	29~35	+26 to +32
Hot (strong heat stress)	35~41	+32 to +38
(Very strong heat stress)		+38 to +46
Very hot (extreme heat stress)	>41	> +46

3.4 미기상 모델 ENVI-met

본 연구에서는 풍속, 풍향과 같은 바람 환경과 열쾌적성 지표를 분석하기 위해 ENVI-met 버전 4.3.2를 사용한다. ENVI-met은 도시 환경에서 지표, 식물 그리고 대기 간의 상호작용을 시뮬레이션할 수 있는 3차원 미기후 모델이다.

ENVI-met은 국지적 규모에서 대기와 토양을 고려하여 다양한 형태와 크기의 건축물, 식생 및 지표면의 특성을 격자별로 3D 모델에 구현하고 이를 시뮬레이션할 수 있다. ENVI-met 분석결과는 기본협력 프로그램인 LEONARDO를 통하여 모델의 격자 위에 입력된 풍속, 풍향 및 대기온도와 같은 변수들을 계산 및 시각화할 수 있다. 또 다른 협력 프로그램인 BioMet은 시뮬레이션을 통해 분석된 풍속, 온도, 습도 등의 수치를 기반으로 PET, UTCI와 같은 열쾌적성 지표로의 계산 및 변환을 수행할 수 있다.

3.5 분석 방법

(1) 시뮬레이션을 위한 ENVI-met 모델 구축

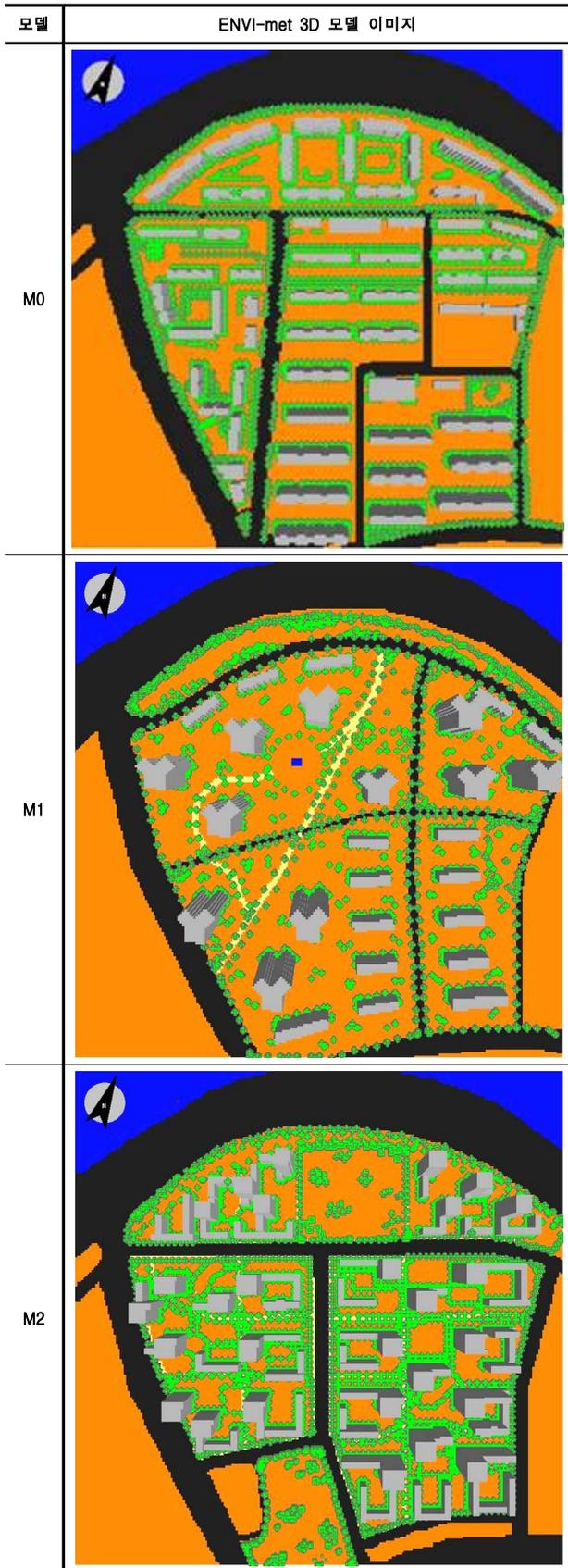
모델의 계산 영역은 압구정 현대아파트단지 제3 특별계획구역 중심을 x축과 y축으로 245개의 격자로 구성되며, 격자 간격은 3.05m로 설정하였다. 이는 x, y 평면상 정사각형의 모델 영역 안에 가로, 세로 약 750m 대상지 영역을 포함함과 동시에 건축물의 형태를 구현하기 위함이다. z축으로는 50개의 격자를 설정하였고, 격자 간격은 3.05m로 설정하였다. ENVI-met 시뮬레이션을 위해서는 모델 내 최고높이 건물의 두 배에 해당하는 대기 영역을 설정하는 것이 권장된다. 본 연구의 모델 건축물의 최고높이는 약 75m로, 해당 높이의 두 배인 150m의 대기공간을 구성하였다.

압구정 현대아파트의 현황에 대한 모델인 M0와 각각 2007년에 제안된 압구정 전략정비구역 마스터플랜 상의 배치계획 모델인 M1, 그리고 2016년에 압구정 아파트지구 지구단위계획 상의 배치계획 모델인 M2를 <표 2>와 같이 구축했다.

two climates in Iran (Arak & Bandar Abbas). Weather. 74. 2019. pp.57 - 64.

16) 1. Matzarakis, A., Mayer, H., Iziomon, M. G. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. International Journal of Biometeorology. 43(2). 1999. pp.76 - 84.
 2. Bröde, P., Kruger, E.L., Fiala, D. UTCI: validation and practical application to the assessment of urban outdoor thermal comfort. Geograph. Polon. 86. 2013. pp.11 - 20.
 17) Höppe, P. The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. Int. J. Biometeorol. 43. 1999. pp.71 - 75.
 18) Asghari, M., Teimori, G., Abbasinia, M., Shakeri, F., Tajik, R., Ghannadzadeh, M. J., Ghalhari, G. F. Thermal discomfort analysis using UTCI and MEM1 (PET and PMV) in outdoor environments: case study of

<표 2> ENVI-met 3D 모델



세 가지 모델 모두 기존 또는 계획상에 존재하는 콘크리

트 건축물과 아스팔트 도로를 포함하며, 북쪽에는 한강이 깊은 물(deep water)로 설정되어 있다. 지표면은 아파트 건축물을 제외하고 옥토(loamy soil)로 구현되어 있으며, 건축물 주변과 도로 측면의 식생은 버드나무(populus alba: 높이 7m, 수관폭 5m)와 아까시나무(robinia pseudoacacia: 높이 12m, 수관폭 7m)로 설정되었다. M1의 북쪽에서 서쪽으로 형성되어 있는 보행로는 노란색 벽돌 도로(yellow brick road)로 설정되었다. 또한, 아파트 건축물의 형태를 보다 정확하게 표현하고자 관상형 건축물의 장면과 모델영역의 x 축의 평행을 맞추기 위해 시계방향으로 22.25° 회전시켰다.

(2) 시뮬레이션 분석조건

시뮬레이션의 날짜는 2016년 8월 5일로 선정하였다. 이는 당해 최고기온이 기록된 8월 중 가장 높은 평균기온이 기록된 날짜이며(기상청 기상자료개방 포털), 낮 기온이 높게 나타나는 오후 3시의 대상지 열 환경 및 열쾌적성을 관찰하고자 하였다. 대상지의 열쾌적성을 분석하기 위하여 오전 11시부터 오후 5시까지 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행시간이 6시간인 이유는 ENVI-met 시뮬레이션 구동에서 처음과 마지막 시각의 분석결과물이 초기화 및 수렴 오류가 발생할 수 있기 때문이며, 이를 방지하기 위해서는 관찰하고자 하는 시간대의 전후로 2~3시간 정도의 완충구간이 필요하기 때문이다.^{19) 20)}

풍속, 풍향, 온도와 관련된 분석 조건은 2011년부터 2016년까지의 기상청 자료를 바탕으로 평균풍속 1.6m/s, 주풍향 56.5°, 초기온도 값 26.5°C의 입력 값을 설정하였다. 토양, 습도, 복사에너지, 구름양, 난류, 경계조건, 식생의 증발조건 등의 입력은 ENVI-met의 기본값을 적용하였다<표 3>.

<표 3> ENVI-met 시뮬레이션을 위한 설정값

Simulation Parameter	Input parameter value
Start simulation at day (DD.MM.YY)	2016.08.05
Start simulation at time (HH.MM.SS)	11:00:00
Total simulation time (hours)	6
Save model state frequency (min)	60
Wind speed in 10m ab. ground (m/s)	1.6
Wind direction (degrees)	56.5
Roughness length z0 at reference point	0.01
Initial temperature atmosphere (°C)	26.5
Specific humidity in 2500m (g water/kg air)	7
Relative humidity in 2m (%)	50

분석 결과물은 PET, UTCI와 같은 열쾌적성 지표로의

19) Ng, E., Chen, L., Wang, Y., Yuan, C. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. Building and Environment. 47. 2012. pp.256 - 271.

20) Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., de Lieto Vollaro, A. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. Sustainable Cities and Society. 26. 2016. pp.318 - 343.

변환을 위해 BioMET 프로그램을 통한 가공 단계를 거친다. 이후 결과물은 LEONARDO 프로그램을 통해 분석결과의 이미지로의 시각화와 통계분석을 위한 각 격자의 온도, PET, UCI 데이터가 Excel(csv) 파일로 출력된다.

(3) 통계분석

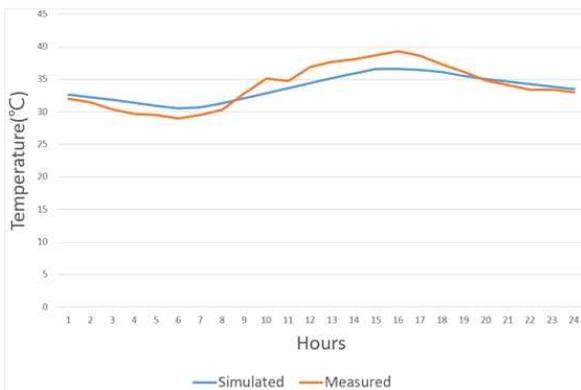
추출한 시뮬레이션의 데이터를 기반으로 일원 분산분석(one-way ANOVA)을 수행하여 각 분석모델 지표의 평균에 대한 통계적 유의성을 검증하고자 한다. 이후 사후검정(post-hoc analysis)을 위해 본페로니 교정(Bonferroni correction)을 적용하고자 한다. 각 통계분석에는 STATA/MP 15.0버전을 사용한다.

일원 분산분석은 Fishher에 의해 개발된 3개 이상의 그룹 간의 평균을 검정할 때 사용하는 분석방법이다. 하지만 분산분석에 의한 분석결과는 세 가지 모델 사이에 통계적 유의성이 존재하는지는 확인할 수 있으나, 각 모델 간의 구체적인 유의성은 구분할 수 없다.

때문의 각 모델 간의 구체적인 유의 관계를 알아보기 위해, 본페로니 교정을 통한 사후검정을 수행하고자 한다. 본페로니 교정은 다중비교에서 발생할 수 있는 1종 오류를 방지하기 위해 유의확률을 검정하는 가설의 수만큼 낮추어 검정하는 사후검정 방법이다.

(4) 미기상 모델 검증

미기상 모델을 사용하는 연구의 신뢰도를 높이기 위해 분석에 사용하는 모델의 타당성 검증이 필요하며, 이를 위해 다수의 선행연구에서는 실측자료와의 비교를 수행하고 있다. 본 연구의 분석을 위해 선정된 ENVI-met 모델의 검증을 위해, ENVI-met 모델의 시뮬레이션 분석결과와 기상청에서 운영하는 강남 기상관측소 근처에서 실측을 통해 수집된 자료를 비교한다. 이를 위한 실측과 ENVI-met 시뮬레이션은 2016년 8월 5일 기준, 각각 24시간 동안 진행되었으며, 이를 비교한 결과는 <그림 6>과 같다.



<그림 6> ENVI-met 검증을 위한 시뮬레이션과 실측값 비교결과

비교결과 ENVI-met 시뮬레이션 결과로 나타난 24시간

동안 온도는 실측자료와 비교했을 때 일교차가 다소 적게 나타났으며, 오전 8시부터 오후 7시까지는 실측값보다 약 2~4°C가량 낮게 측정되었다. 하지만 시간에 따른 온도 변화의 경향성은 두 결과 모두 비슷한 양상을 보이며, 회귀분석 결과 R-square 값은 0.906으로써 상당히 높은 일치성을 보인다. 따라서 본 연구에서 사용된 ENVI-met 모델의 온도 시뮬레이션 분석결과는 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 분석 결과

본 연구는 공동주택단지의 건축 배치 변경에 따른 열쾌적성의 변화를 확인하기 위해 서로 다른 배치계획안(M0, M1, M2)을 대상으로 미기상 모델인 ENVI-met을 통한 시뮬레이션 분석을 진행하였다.

시뮬레이션 결과는 LEONARDO 프로그램을 통해 시각화되었으며, 이후 통계분석을 위해 엑셀(csv) 파일로 추출되었다. 먼저 각각의 ENVI-met 시뮬레이션 결과 이미지 분석과 기술통계를 나타내며, 이후 일원 분산분석(one-way ANOVA)과 본페로니교정(t-test with Bonferroni correction)을 통해 각 분석모델 간의 통계적 유의성을 판단하고자 한다.

4.1 ENVI-met 분석결과

(1) 풍속

M0는 대상지 서쪽과 북쪽의 중정형 배치 안쪽으로 풍속이 1.0 m/s보다 낮은 지역이 다수 분포하고 있다. 주풍향과 판상형 건축물의 장변이 평행하므로 풍속 1.0~1.5 m/s의 바람의 흐름이 동쪽에서 서쪽으로 나타나고 있으며, 판상형 건축물 사이를 지날 때 1.5~2.0 m/s로 가속하는 것을 볼 수 있다.

M1은 전반적으로 풍속 1.0~1.5 m/s의 바람 흐름이 동쪽에서 서쪽으로 나타나고 있으며, M0와 동일하게 바람의 흐름이 판상형 건축물 사이를 지날 때 일시적으로 1.5~2.0 m/s로 가속하는 영역을 다수 확인할 수 있다. 또한, 각 건축물의 서쪽을 제외하면 풍속 1.0 m/s 이하의 영역은 거의 나타나지 않는다.

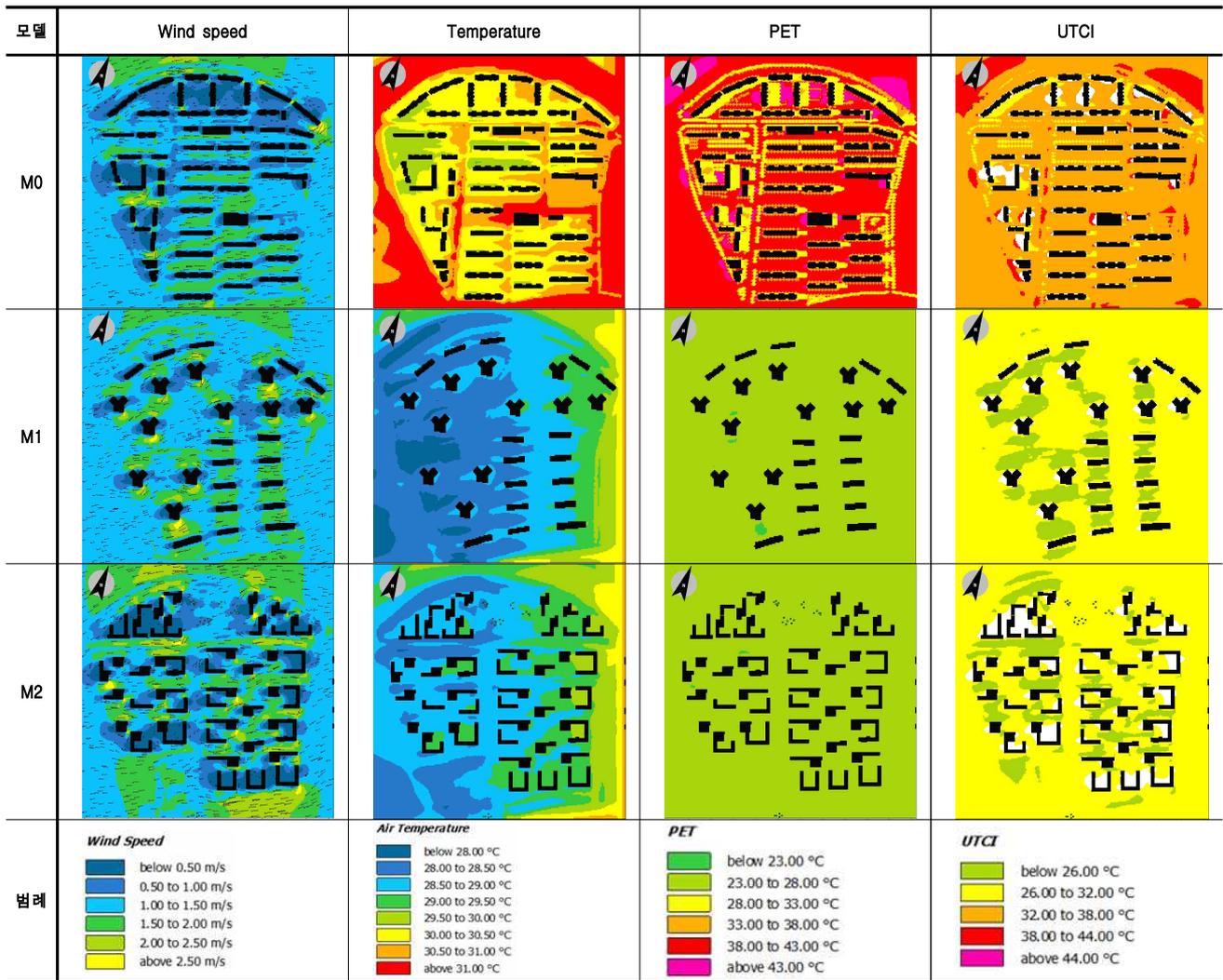
M2는 M0와 마찬가지로 탑상형 건축물과 판상형 건축물에 의해 U자로 결합하여 중정형 배치를 이루는 곳 안쪽의 대부분 지역에서 풍속이 1.0 m/s보다 낮게 나타난다. 하지만 이를 제외하면 건축물 사이로 풍속 1.5~2.0 m/s의 바람이 단지 내부를 지나고 있음이 확인된다.

(2) 온도 및 열쾌적성 지표 (PET, UCI)

<표 4>는 공동주택단지의 건축물 배치변경에 따른 모델별 풍속과 온도 및 열쾌적성 지표 분석결과를 나타낸다.

분석결과 각 모델의 평균온도는 M0가 가장 높게 나타났으며, M1과 M2와 비교하였을 때 그 차이는 상당한 수준인

<표 4> ENVI-met 시뮬레이션 풍속, 온도 및 열쾌적성 지표 결과 비교



것으로 나타난다. M1과 M2 모두 M0와 비교했을 때 상대적으로 양호한 열 환경을 나타내고 있으나, 육안으로 살펴 보았을 때 28.5°C 미만의 온도가 나타나는 영역이 M1에서 더 넓게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 세 모델 모두 동쪽에서 서쪽으로 갈수록 단지 내부의 온도가 낮아지는 경향을 보이며, 각 모델의 서쪽에서 상대적으로 온도가 가장 낮게 나타나는 영역(M0: 29.5~30°C; M1: 28°C 미만; M2: 28~28.5°C)은 대부분 풍속이 1.5~2.0 m/s인 영역과 일치하는 경향을 보인다.

PET와 UTCI 두 열쾌적성 지표 모두 온도가 중요 요인으로 작용하기 때문에, PET와 UTCI의 분석 결과 역시 M0에서 가장 높게 나타나며, M1, M2와 비교하였을 때 큰 차이가 확인된다. M1과 M2의 열쾌적성은 이미지상으로 보았을 때 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 하지만 대부분 영역이 23~28°C로 나타나는 PET와는 달리 UTCI 분석결과는 26~32°C의 영역과 26°C 미만의 영역으로 명확한 구분이 확인된다. 이때, 26°C 미만의 영역은 온도 분석 결과와 마찬가지로

가지로 풍속 분석결과 이미지에서 1.5~2.0 m/s의 영역과 비슷한 양상을 보임을 확인할 수 있다.

4.2 기술 통계

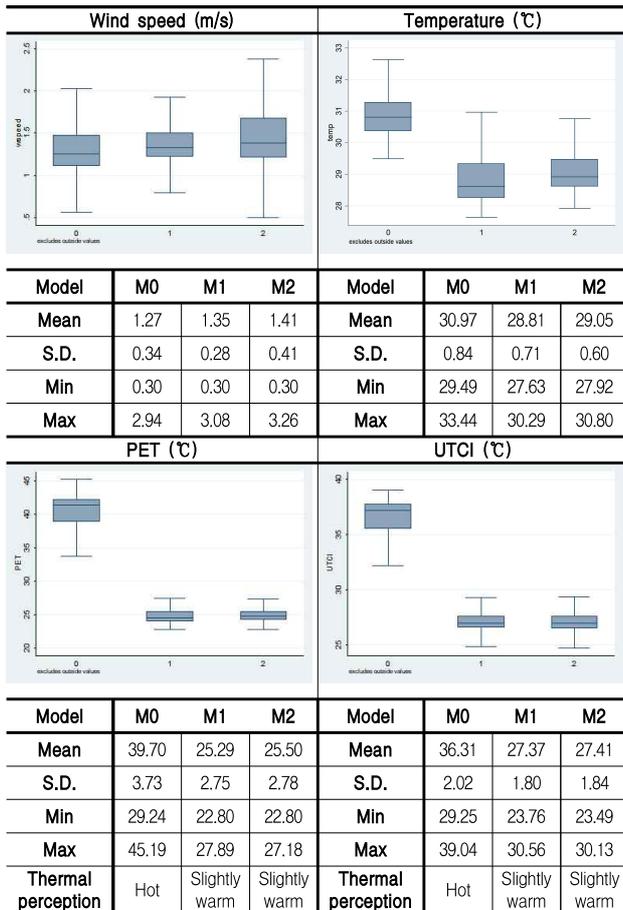
<표 5>에서 M0의 평균풍속은 1.27 m/s로 세 모델 중 가장 낮으며, 표준편차는 0.34, 범위는 0.30~2.94로 나타난다. M1의 평균풍속은 1.35 m/s로 세 모델 중 두 번째로 높으며, 표준편차는 0.28로 세 모델 중 가장 낮다. 범위는 0.30~3.08로 나타난다. M2의 평균풍속은 1.41 m/s로 세 모델 중 가장 높다. 표준편차는 0.41로 세 모델 중 가장 높으며, 범위는 0.30~3.26으로 나타난다.

M0의 평균온도는 30.97°C로 세 모델 중 가장 높으며, 표준편차 역시 0.84로 가장 높게 나타난다. 범위는 29.49~33.44로써 최솟값과 최댓값 모두 세 모델 중 가장 높다. M1의 평균온도는 28.81°C로 세 모델 중 두 번째로 높으며, 표준편차는 0.71이다. 범위는 27.63~30.29로 최솟값과 최댓값 모두 세 모델 중 가장 낮게 나타난다. M2의 평균온도는 29.05°C

이며, 표준편차는 0.60으로 세 모델 중 가장 낮다. 범위는 27.92~30.80으로 나타난다.

열쾌적성 지표인 PET와 UTCI의 모델별 분석 결과는 그 경향성에 있어 상당히 유사하게 나타났다. M0는 PET와 UTCI 모두 평균, 표준편차 그리고 범위의 최솟값, 최댓값에 대해 모두 세 모델 중 가장 높게 나타났다. 또한, M1은 PET와 UTCI 모두 평균과 표준편차는 M2보다 낮았으며, 범위의 최솟값, 최댓값은 M2보다 높게 나타났다.

<표 5> ENVI-met 모델별 풍속, 온도, PET, UTCI 기술통계



한편, 각 모델의 PET, UTCI 평균 수치에 대한 열 인지 단계는 PET와 UTCI 모두 M0가 Hot (strong heat stress) 단계로, M1과 M2는 Slightly warm (slight heat stress) 단계인 것으로 나타났다.

4.3 ANOVA 분석과 Bonferroni 검정

ANOVA 분석은 3개 이상의 그룹 간의 평균을 검정할 때 사용하는 분석방법이다. 본 연구에서는 기술통계를 통해 공동주택단지의 배치변경에 따른 세 가지 모델의 평균풍속, 평균온도 그리고 열쾌적성 지표(PET, UTCI)의 평균에 차이가 있음을 확인하였다. 이후 모델 간의 평균풍속 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하기 위해 일원분산분석(one-way

ANOVA)을 수행하였다.

세 모델 간의 ANOVA 분석결과 f-value는 풍속이 1991.91, 온도가 1.4e+05, PET가 3.7e+05, UTCI가 3.9e+05로 나타났으며, 유의수준 0.01에서 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 하지만 이 결과는 세 모델을 비교했을 때 적어도 하나의 유의한 차이가 있음을 의미할 뿐, 각 모델 간의 구체적인 통계적 유의한 차이는 확인 할 수 없다.

<표 6> ANOVA 분석 결과

Model	Variable	F-statistics	p-value
M0, M1, M2	Wind speed	1991.91	< 0.01
	Temperature	1.4e+05	< 0.01
	PET	3.7e+05	< 0.01
	UTCI	3.9e+05	< 0.01

ANOVA 분석을 통해 세 모델 사이에 통계적으로 유의한 차이가 있음을 확인한 뒤, 각 모델 간의 평균풍속, 평균온도 그리고 열쾌적성 지표(PET, UTCI)의 평균 사이의 구체적인 통계적 유의성을 확인하고자 본페로니 검정(Bonferroni correction)을 수행하였다.

분석 결과, 세 모델 간의 평균풍속, 평균온도 그리고 열쾌적성 지표(PET, UTCI)의 평균 사이에는 유의수준 0.01에서 통계적으로 유의한 차이가 있음이 확인된다.

<표 7> Bonferroni 검정 결과

		M0	M1
Wind speed	M1	0.076**	
	M2	0.136**	0.060**
Temperature	M1	- 2.160**	
	M2	- 1.924**	0.237**
PET	M1	- 14.416**	
	M2	- 14.204**	0.212**
UTCI	M1	- 8.938**	
	M2	- 8.900**	0.038**

Note: ** p<0.01

4.4 분석 결과에 대한 논의

<표 4>에 나타난 ENVI-met 시뮬레이션 분석 결과 이미지를 비교했을 때 풍속이 높은 영역에서 온도와 열쾌적성 수치가 낮게 나타나는 경향성을 띄고 있다. 이를 통해 PET, UTCI 등의 열쾌적성 지표는 온도와 풍속의 영향을 받는다는 다른 선행연구의 결과를 확인할 수 있었다.

M0는 대상지 북쪽과 서쪽의 관상형 건축물에 의해 둘러싸인 중정형 배치가 주풍향으로부터 불어오는 바람의 경로를 차단하고, 이로 인해 해당 영역에서의 풍속은 현저하게 낮게 나타난다. 이렇게 풍속이 낮은 영역에서는 높은 온도가 관찰되는데, 그 원인은 외부로부터 차가운 바람이 유입되지 못하고 대기가 정체되기 때문으로 판단된다. 대기

가 정제될 경우 지표면이나 건축물 표면은 바람에 의한 냉각 효과를 받지 못하여 표면 온도가 상승하게 된다. 그럼에도 불구하고 M0는 M1과 M2와 비교했을 때 눈에 띄게 온도와 열쾌적성 지표가 높게 나타나는데, 이는 M0의 건축물 인동간격이 좁고, 대상지 전반적으로 건축물이 밀집되어 있어 보다 높은 온도분포가 나타난 것으로 추측된다.

M2 역시 건축물에 의하여 주풍향으로부터 불어오는 바람의 경로 차단이 발생하고 내부 영역에서 낮은 풍속, 높은 온도가 관찰되고 있으나 대상지 남쪽과 북쪽 중앙에 있는 오픈스페이스로 인하여 M0와 비교했을 때 상대적으로 높은 평균풍속이 형성되어 평균온도가 낮게 나타난 것으로 추측된다. M1은 남동쪽과 북쪽의 일부 관상형 건축물을 제외하면 대부분 답상형 건축물로 배치되어 있어 인동간격이 크고 바람의 경로 차단이 발생하지 않아 평균풍속은 두 번째로 높고, 평균온도는 가장 낮게 나타난 것으로 추측된다.

M1과 M2를 비교했을 때 평균풍속은 M2가 세 모델 중 가장 높게 나타났지만, M0와 마찬가지로 건축물의 U자 배치로 인해 바람 경로가 차단되어 해당 지점의 풍속은 낮아지고, 온도는 상승하게 된다. 이러한 배치가 대상지 전반에 걸쳐 다수 존재하기 때문에 M2의 평균온도가 M1보다 높은 것으로 판단된다. 열쾌적성 지표의 평균 역시 PET와 UTCI 모두 M2가 M1보다 높았으며, Bonferroni 검정을 통해 이 차이가 통계적으로 유의함을 확인하였다. 하지만 M1과 M2의 각 지표 수치에 따른 열 인지 단계는 PET, UTCI 모두 Slightly warm(slight heat stress)으로 동일하기 때문에, 실질적으로 거주민들이 느끼는 열쾌적성은 차이가 없다고 판단된다.

5. 결론 및 제언

5.1 결론

본 연구는 공동주택단지의 건축물 배치변경이 여름철 이상고온으로 인한 거주민들이 느끼는 열쾌적성의 변화를 확인하기 위해, 서로 다른 세 가지 건축물 배치의 미기상 모델 ENVI-met을 통한 시뮬레이션 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 본 연구에서 수행된 M0, M1, M2의 시뮬레이션 분석을 통해, M0(대상지 현황)에서 M1, M2로의 건축물의 배치 변경에 따른 열쾌적성의 변화를 확인할 수 있었고, 실제 인간이 느끼는 열 인지 단계에도 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이는 다른 열쾌적성 관련 선형연구에서 주로 분석되는 표면 재질의 변화, 조경 계획뿐만 아니라, 건축물의 배치 계획을 통해서도 도시지역 거주민들의 열 스트레스 감소 및 열쾌적성 개선이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

둘째, 대상지의 현황 배치는 여름철 이상고온 완화와 거주민이 느끼는 열쾌적성 개선에 상당히 불리한 것으로

나타난다. 따라서 현재의 압구정 아파트지구 제3 특별계획구역의 거주민이 느끼는 열쾌적성은 상당히 열악하여 도시 형태 부문에서의 개선이 필요하다고 판단된다. 도시 형태의 특성상 아파트 건축물과 같은 콘크리트 구조물이 단기간 내에 변화하기는 어렵지만 본 연구 대상지는 노후화에 따른 재건축 논의가 활발히 진행 중이기 때문에 이를 기회 삼아 외부환기성능 및 열쾌적성의 개선을 위한 배치계획에 대한 충분한 고려가 이루어진다면 거주민이 느끼는 열 스트레스 및 열쾌적성을 크게 향상하게 시킬 기회가 될 것으로 판단된다.

연구 대상지인 압구정 아파트지구 제3 특별계획지구의 현황배치(M0)에 대한 시뮬레이션 분석 결과, 다른 배치 계획안(M1, M2)과 비교하였을 때, 평균풍속은 가장 낮게, 평균 온도는 가장 높게 나타났다. 이에 따라 열쾌적성 지표인 PET와 UTCI의 평균 역시 대상지의 현황배치에서 현격히 높게 나타났으며, 열쾌적성 지표에 따른 열 인지 단계상으로 무려 두 단계의 차이를 나타내는 것으로 확인되었다. 이러한 차이는 대상지의 북쪽의 오픈스페이스 조성 여부에 따른 단지 내부로 유입되는 바람과 연관이 있는 것으로 판단된다.²¹⁾ 대상지 북쪽에 오픈스페이스가 형성되어 있는 다른 두 배치계획안과 달리 현황배치의 경우 관상형 건축물의 중정형 배치 때문에 바람의 경로가 차단되어 있다는 차이를 보인다.

셋째, 본 연구에서 현황배치보다 열쾌적성 측면에서 더 나은 분석 결과가 나타난 대안 배치 계획인 M1과 M2의 배치계획 상을 통해 단지 내부의 열쾌적성 개선을 위해서는 바람 경로의 차단을 지양하는 것이 중요한 것으로 나타났다. 이를 위해서는 공동주택의 건축물 배치 계획단계에서는 대상지의 주풍향을 비롯한 기후환경을 사전조사가 필요하며, 오픈스페이스의 조성과 더욱 넓은 건축물 인동간격의 확보되어야 한다고 판단된다. 또한, 건축물에 의해 둘러싸이는 중정형 배치는 바람 경로를 차단하고, 내부 영역에서는 대기정체 현상이 확인되었다. 이는 곧 대상지의 바람에 의한 냉각작용을 저하해 여름철 이상고온에 의한 거주민이 느끼는 열쾌적성을 악화시킬 것으로 여겨진다.

넷째, ENVI-met 시뮬레이션 분석 결과에 나타나 풍속, 온도 그리고 열쾌적성에 대한 이미지들을 비교했을 때, 풍속이 높게 나타나는 영역과 온도가 낮게 나타나는 영역 간에 유사한 분포가 나타났으며, 이는 곧 배치 계획에 따른 풍속의 변화가 온도분포의 변화에도 영향을 미친다는 것을 의미한다. 온도는 열쾌적성 지표의 주요 매개변수이기 때문에 결과적으로 풍속의 변화가 열쾌적성의 변화에까지 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

21) Ng, E. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities - air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. Building and Environment. 44. 2009. pp.1478 - 1488.

5.2 제언

오늘날 도시지역의 여름철 이상고온 등과 같은 기후 변화 문제에 대한 국내 정책은 각종 산업부문의 온실가스 배출 등의 주원인에 대한 통제가 주를 이루고 있다. 하지만 도시 지역의 기후문제 완화는 도시 형태의 변화를 통해서도 가능하다는 것이 많은 선행연구를 통해 밝혀졌다.

도시 형태 변화를 통한 도시지역의 기후 문제를 해결하는 방법은 전술한 발생 원인을 규명하고 이를 통제하는 방법보다 더 큰 비용과 시간이 소요되기 때문에 단기간 내에 그 적용이 어려울 수 있다. 하지만 이 두 가지 방안은 어느 한쪽을 선택해야 하는 것이 아니라, 병행되어야 한다고 사료된다. 전자를 단기간의 변화에 맞게 그때마다 대응방안을 제시할 수 있는 소프트웨어에 비유한다면, 후자는 단기간 내의 변화는 어렵지만, 설계 및 구축 단계에서 문제 현상에 대한 충분한 고려가 반영될 때, 보다 장기간에 걸친 지속적인 효과를 발휘할 수 있는 하드웨어로 비유될 수 있을 것이며, 이 두 가지 요인은 어느 한쪽만을 향상되는 것보다, 함께 관리되고 개선될 때 시너지 효과(synergy effect)를 발휘할 것으로 기대된다. 이에 따라 본 연구에서는 다음과 같은 도시 지역의 열쾌적성 및 기후 문제 해결을 위한 정책의 확대를 제언하고자 한다.

첫째, 도시지역의 열쾌적성의 개선을 위한 도시 규모의 바람 경로가 계획되어야 한다. 본 연구에서는 하나의 공동주택단지를 대상으로 열쾌적성을 개선할 수 있는 바람환경의 조성을 위한 배치계획이 제시되었다. 하지만 본 연구 결과가 도시규모에서 실질적으로 효과를 나타내기 위해서는, 하나의 주거단지로의 적용에 그치는 것이 아닌, 인접한 다수의 주거단지에 적용됨과 동시에 각각 단지에서 설정된 바람의 경로가 서로 연계되어야만 도시규모에서의 열쾌적성 및 기후변화 문제의 개선 효과를 발휘할 수 있을 것이다.

둘째, 도시별 지자체에서는 지역별 도시기후지도를 작성함으로써, 도시지역 내의 열쾌적성이 개선되어야 하는 지점, 경로 및 영역에 대한 조사를 시행해야 한다. 각 도시의 계절에 따른 기상 조건에 대한 상세한 조사와 지형 및 피복, 용도지역에 대한 조사과정을 통하여, 바람·열 환경이 열악하거나, 변화에 민감한 지역, 그리고 현재 주요하고 유지 및 보존되어야 하는 바람 경로 등에 대한 파악이 필요하다. 이 같은 자료를 토대로 도시 지역의 개발 및 계획에 있어 다음과 같은 제도를 수립하고자 한다.

셋째, 도시 지역의 기후 변화 문제의 완화를 위하여 개발 및 지구단위계획에서 준수되어야 하는 지침이 추가되어야 한다. 본 연구를 비롯한 선행연구들에 따르면 도시 형태의 변화는 도시 지역의 외부환기성능 및 열쾌적성에 영향을 미칠 수 있다. 특히 신도시 개발, 재개발 및 재건축, 해안을 비롯한 수변공간 개발, 고층 건축물의 건축 등은 도시지역의 바람·열 환경에 영향을 미치는 주된 개발계획들로 여겨

진다.²²⁾ 때문에, 개발 시행자는 해당 개발계획이 대상지의 기후 변화에 미치는 영향에 대한 조사 및 보고를 수행하고 이를 평가받아야 한다.

이를 위해서는 우선 지자체는 전술한 도시기후지도를 토대로 각 지역의 일반적인 바람·열 환경에 대한 기준을 설정하고, 개발 시행자는 지자체에서 설정한 풍속 및 열쾌적성 기준을 만족하게 하도록 개발 및 배치 계획을 수립함으로써, 해당 도시 지역의 기후변화 문제를 개선할 수 있도록 해야 할 것이다. 이때, 평가방법에 있어 수립된 계획안의 시뮬레이션 등의 수치모의를 통하여, 해당 계획이 기후환경에 미치는 영향에 대한 검토 절차가 필요하다.

이와 같은 제언들이 실현될 경우, 향후 도시지역의 기후 변화 문제를 해결하면서, 더욱 지속적인 기후 변화 문제의 개선이 나타날 뿐만 아니라, 기존의 기후 변화 문제 발생원인의 통제에 대한 정책 및 규정들과 연계되어 보다 큰 효과를 나타낼 것으로 판단된다.

5.3 한계점 및 의의

본 연구의 한계점은 첫째, 연구에 사용된 미기상 모델인 ENVI-met은 프로그램 특성상 모델의 경계 밖의 주변 환경에 대한 반응이 부족하다. 전술한 기후환경정보 입력 단계에서, 모델의 주변 환경에 대한 정보는 계수를 통해 일괄적으로 부여된다.

모델의 구축 및 시뮬레이션 실행 단계에서 모델 영역 내부의 건축물, 식생, 피복 등의 구조적인 입력조건과 구름양, 일사량 등에 대한 기상학적 입력조건을 상세하게 설정함으로써 더욱 정확한 분석결과를 추구할 수는 있지만, 모델 영역 밖의 건축물, 구조물이 지니는 세부적인 특성에 의한 영향은 여전히 반영되지 못하므로 실제 기후환경과는 다소 차이가 발생할 수 있다.

둘째, 연구 대상지가 서울의 압구정 현대아파트 단지에 한정되기 때문에, 본 연구결과가 기후조건 및 주변 환경이 다른 지역으로 적용될 수 있는지는 불분명하다는 한계점을 지닌다.

셋째, 본 연구는 도시지역의 기후변화 문제의 완화를 위한 건축물 배치의 특성에 대하여, 지향하거나 지양되어야 할 배치에 대한 논의는 이루어졌으나, 구체적인 정량적 수치에 대한 분석을 수행하지 못하였다.

마지막으로 건축물의 형태를 셀 단위로 단순화하여 모델링하는 ENVI-met의 특성상 개별 주거 타입과 전용 및 공용공간의 조합에 따른 영향 등 건축물의 구조적 형태의 효과를 시뮬레이션하는 데 한계가 있었다.

하지만 본 연구는 도시지역의 기후 문제를 완화할 수 있는 도시 형태 변화 중 건축물의 배치변경에 따른 공동주택

22) Ng, E. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities - air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. Building and Environment. 44. 2009. pp.1478 - 1488.

단지의 열쾌적성의 변화를 종합적으로 관찰하였고, 각 요소의 개선에 유리한 배치계획을 선정하여 해당 배치계획이 가지는 특성을 분석하여, 열쾌적성을 개선할 수 있는 바람 환경의 개선이 필요함을 제시하였다. 또한, 분석 과정을 통해 풍속 및 온도가 열쾌적성 지표인 PET와 UTCI에 미치는 영향들을 간접적으로나마 확인하였다. 더 나아가, 도시 지역의 기후 변화 문제를 해결하면서, 발생원인의 규명 및 통제에 초점을 두고 있는 국내 정책의 확대 및 도시형태 변화를 통한 도시 지역의 열쾌적성 및 기후변화 문제 개선방안을 제도적 수립을 통해 구체적으로 제안하였다는 점에서 의의를 지닌다.

참고문헌

- 박중훈 (2013). 도시블록 단위에서 소규모 녹지가 기온저감에 미치는 효과. 서울대학교 공학박사학위논문. 서울.
- 손영훈 (2019). 도시가로공간 열환경 개선기법에 관한 연구. 계명대학교 대학원 석사학위논문. 대구.
- 정다인 (2016). 현장측정과 미기상모델링을 활용한 옥외공간의 열쾌적성 비교. 창원대학교 석사학위논문. 창원.
- Asghari, M., Teimori, G., Abbasinia, M., Shakeri, F., Tajik, R., Ghannadzadeh, M.J., Ghalhari, G.F. (2019). Thermal discomfort analysis using UTCI and MEMI (PET and PMV) in outdoor environments: case study of two climates in Iran (Arak & Bandar Abbas). *Weather*. 74. 1.
- Batty, M. (2007). *Cities and complexity*. Cambridge: MIT Press.
- Bröde, P., Krüger, E.L., Fiala, D. (2013). UTCI: validation and practical application to the assessment of urban outdoor thermal comfort. *Geograph. Polon.* 86. 1.
- Caniggia, G. and Maffei, G. L. (2001). *Architectural composition and building typology: interpreting basic building*. Florence: Alinea.
- Chae, Y. (2010). Co-benefit analysis of an air quality management plan and greenhouse gas reduction strategies in the Seoul metropolitan area. *Environmental Science & Policy*. 13. 3.
- Givoni, Baruch. (1988). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York: John Wiley & Sons.
- Hillier, B. (1996). *Space is the machine*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hagishima, A., Tanimoto, J., Nagayama, K., Meno, S. (2009). Aerodynamic Parameters of Regular Arrays of Rectangular Blocks with Various Geometries. *Boundary-Layer Meteorol.* 132.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol.* 43.
- Huang, J., Wang, R., Li, F., Yang, W., Zhou, C., Jin, J., Shi, Y. (2009). Simulation of thermal effects due to different amounts of urban vegetation within the built-up area of Beijing, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 16. 1.
- Jin, H., Liu, Z., Jin, Y., Kang, J., Liu, J. (2017). The Effects of Residential Area Building Layout on Outdoor Wind Environment at the Pedestrian Level in Severe Cold Regions of China. *Sustainability*. 9.
- Johansson, E., Emmanuel, R. (2006). The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Biometeorology*. 51. 2.
- Kanda, M. (2006). Large-Eddy Simulations on the Effects of Surface Geometry of Building Arrays on Turbulent Organized Structures. *Boundary-Layer Meteorol.* 118.
- Lynch, K. (1981). *Good city form*. Cambridge: MIT Press.
- Matzarakis, A., Mayer, H., Iziomon, M.G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*. 43. 2.
- Middel, A., Häb, K., Brazel, A.J., Martin, C.A., Guhathakurta, S. (2014). Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*. 122.
- Ng, E. (2009). Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. *Building and Environment*. 44.
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., Yuan, C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*. 47.
- Nordstrom, K.F., Jackson, N.L. (1998). Effects of a high rise building on wind flow and beach characteristics at Atlantic City, NJ, USA. *Ocean & Coastal Management*. 39.
- Panferov, O., Knyazikhin, Y., Myneni, R.B., Szarzynski, J., Engwald, S., Schnitzler, K.G., Gravenhorst, G. (2001). The role of canopy structure in the spectral variation of transmission and absorption of solar radiation in vegetation canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 39. 2.
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 26.
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., de Lieto Vollaro, A. (2016). Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*. 26.
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., Erell, E. (2011). The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*. 31.
- Streiling, S., Matzarakis, A. (2003). Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city: a case study. *Journal of Arboriculture*. 29. 6.

[논문접수 : 2020. 10. 02]

[1차 심사 : 2020. 10. 15]

[게재확정 : 2020. 10. 25]