Check for updates

Journal of Climate Change Research 2021, Vol. 12, No. 6, pp. 777~795
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2021.12.6.777

도시내 폭염 대응사업의 온도저감 효과 추정에 관한 연구

양호진* · 이광진** · 배민기*** · 이채연****†

*한국외국어대학교 대기환경연구센터 선임연구원, **연세대학교 응용해석 및 계산센터 박사후연구원, ***충북연구원 재난안전연구센터장, ****한국외국어대학교 대기환경연구센터 책임연구원

Estimation of the Temperature Reduction Effect of Heatwave Response Projects in Urban Spaces

Yang, Hojin* · Lee, Gwangjin** · Bae, Mingi*** · Yi, Chaeyeon****†

*Researcher, Research Center for Atmospheric Environment, HUFS, Korea
**Postdoctoral Fellow, Yonsei University, Seoul, Korea
***Director of the Chungbuk Disaster Safety Research Center, Chungbuk Research Institute, Korea
****Principle Researcher, Research Center for Atmospheric Environment, HUFS, Korea

ABSTRACT

In this study, to determine areas with high thermal stress in the city of Cheongju and properly respond to damage from heat waves, the scenarios of roof greening, cool roofs, cooling fog, clean roads, and urban green spaces were considered. Using the urban-scale microclimate analysis modeling method, it was determined if the heat wave damage reduction facility was effective in lowering the temperature or thermal comfort index. Cooling fog and clean roads, which are implemented on short-term scales, showed temporary temperature reduction effects using water, but also rose slightly with time delay while lowering the universal thermal comfort index UTCI. Long-term green and cool roofs have the effect of reducing the surface temperature by changing the albedo of the building's roof surface. In the area with a cool roof, the temperature decrease was large initially, while the temperature increase was the weakest despite the increases in solar radiation and radiation during the daytime. Based on a detailed analysis of industrial complexes with the highest heat stress, the scenarios that lowered the UTCI were cooling fog, cool roofs, and urban forest creation. If these three scenarios are properly implemented in industrial complexes and surrounding areas, which are the highest heat dissipating areas in Cheongju, the urban thermal environment and energy consumption will be improved. It is expected that the results of this study will be used to increase the sensitivity of decision-making processes for installing heatwave reduction facilities and heatwave response policies.

Key words: Clean Road, Cool Roof and Green Roof, Cooling Fog, Structural Response Policy, Thermal Comfort

1. 서론

세계보건기구(WHO)는 폭염을 21세기 사람들의 건강을 위협하는 가장 큰 요인으로 지목한 바 있다. 이를 증명하듯 올해 더운 공기를 가두는 열돔 현상에 캐나다가 48.6℃까지 치솟아 약 800여 명이 사망하고 북미 북서부 136곳에 산불이 발생하는 등 지구촌 곳곳이 매해 발생하는 폭염으로 인해 인명, 인프라 및 경제에 심각한 피해를 보고 있다. 우리나라도 2018년 최악의 폭염피해를 겪으면서 '재난 및 안전관리 기본법'을 개정해 폭염을 자연 재난에 포함한 바 있다. 태풍, 집중호우, 산사태 등과 비교해 폭염피해는 눈에 보이지 않으면서 야외노동자, 고령 저소득자, 만성질환자 등에 피해가 가중되는 특징이 있어 '보이지 않는 살인마'라고 불린다. 실제로 우리나라의 2011년 ~ 2019년 동안 통계청의 폭염 사망자 수는 총 493명으로 같은 기간 태풍과 호우에 의한 인명피해를 합친 것보다 3.6배 정도 많

†Corresponding author : prpr2222@hufs.ac.kr, (HUFS DORM D-1F Global Campus 81, Oedae-ro, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17035, Korea. Tel. +82-31-8020-5586)

ORCID 양호진 0000-0001-7321-768X 이광진 0000-0003-4570-7141 배민기 0000-0001-8127-131X 이채연 0000-0003-2802-2431

Received: September 23, 2021 / Revised: October 08, 2021 1st, November 01, 2021 2nd / Accepted: November 15, 2021

다. 올여름 온열질환자도 1,212명으로 지난해 같은 기간보다 2.6배(753명)나 늘었다. 이처럼 기후 위기로 폭염의 강도가 커지고 일상화가 되면서 '폭염피해 최소화'는 국가와 지자체 기후변화 적응계획에서 가장 중요한 정책 목표 중 하나가 되었다.

국가와 지자체의 폭염 대응 정책은 크게 쿨루프, 쿨링포그, 녹화사업 등의 구조적인 대책과 취약계층 지원 중심의 비구조적인 대책 2가지로 구분되는 데 폭염시 취약계층 보호와 긴급 지원을 중심으로 한 비구조적인 대책에 초점이 맞춰져 있다. 이는 그간 온열질환 감시체계를 통해 폭염 피해자들의 발생 위치나 피해 원인 등이 규명되어 왔기 때문에 뚜렷한 정책효과를 기대할 수 있기 때문이다. 하지만, 폭염시 도심 내 주요 열 발생 공간 및 건축물을 대상으로 직접적으로 온도를 저감시키는 구조적인 대책들도 일상생활 속에서 폭염으로부터 많은 도시민의 건강을 지키는데 기여하기 때문에 적극적인 도입이 필요하다. 이미 자연재해대책법 시행령 제24조의 2항(2021.6.23.)에 폭염 대응을 위한 폭염 저감시설 설치가 규정되어 있으며, 지자체별로 폭염 저감시설 설치 규정이 포함된 폭염 및 도시열섬현상 대응 조례안을 제정하고 있다(Incheon Metropolitan City, 2019; Daegu Metropolitan City, 2018). 특히, 최근 폭염으로 인한 충격 흡수력과 평상시로의 회복력(resilience) 개선을 위한 그린인프라 도입방안이 도시계획차원에서 활발히 논의되면서 폭염 대응시설에 대한 중요성이 더욱 커지고 있다. 이러한 쿨링포그, 클린로드, 쿨루프, 바람길 숲과 같은 폭염 저감시설 설치를 지자체에 확산시키기 위해서는 도시내 설치되었을 때 폭염시 실제로 어느 정도의 온도 저감효과가 있는지에 대한 과학적 분석 결과를 제공하는게 반드시 필요하다. 수도권대기환경청(Metropolitan Air Environment Agency, 2014)과 환경부(Ministry of Environment, 2020)가 특정 지역에 쿨링포그와 클린로드를 설치 후 직접 노면온도 변화를 측정한 바 있지만, 폭염 시 적용 효과를 분석하지는 못하였으며, 그 외 다양한 폭염 저감시설에 대한 분석은 거의 이뤄진 바 없는 실정이다. 어디에 어떤 폭염 저감시설을 얼마나 설치하는게 좋을까? 그러면 어느 정도의 온도 저감효과를 기대할 수 있을까?에 대한 과학적 분석은 지자체에서 폭염 저감시설 설치 타당성을 부여할 수 있고, 나아가 폭염으로 인한 시민들의 건강 및 재산피해를 줄이는데 기여할 수 있기 때문에 중요한 연구주제이다. 하지만, 기존의 폭염 관련 연구는 폭염위험과 취약계층거주지와의 공간관계를 해석한 연구(Bae et al., 2020; Song et al., 2020), 공간분석을 통해 폭염 취약지역을 찾아내는 연구(Lee and Cha, 2019; Kim and Kim, 2020), 폭염 적응정책 분석(Choi and Ha, 2015; Kim et al., 2012), 폭염으로 인한 도시 표면온도 변화(Yang et al., 2019; Kim et al., 2019), 폭염과 토지이용간의 관계(Kim et al., 2020), 폭염과 건강영향(Chae et al.,.2016; Shin et al., 2015), 폭염저감시설 입지 선정(Shim et al., 2020) 등 다양한 목적의 연구들이 수행되어 왔으나, 특정 공간과 사업에만 제한된 경우가 많았다. 특히 도시에 폭염대응 시나리오를 세우고 다양한 폭염대응 시설을 적용한 후 폭염 시 온도 저감효과를 추정해본 연구는 거의 없었다. 따라서 본 연구는 청주시를 대상으로 도시 내에서 온열 스트레스가 높은 지역을 찾아 폭염피해 대응을 위한 옥상녹화, 쿨루프, 쿨링포그, 클린로드, 도시녹지 조성 시나리오를 적용하고, 도시규모의 미기후 분석 모델링 접근방법을 이용하여, 폭염 저감시설 설치가 어느 정도의 온도저감 효과가 있는지를 추정해보고자 한다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 연구대상지

본 연구는 충청북도 청주시를 대상으로 하였다. 청주시는 2018년 여름 38.3℃까지 기온이 올라 1967년 이후 낮 최고기온을 기록했으며 저녁 6시 ~ 아침 9시까지 최저기온이 25℃ 이상인 열대야 일수가 전국에서 가장 긴 34일 동안 이어지는 등 폭염 위험 노출 빈도와 강도가 증가하고 있어 실효성 있는 폭염 대응 정책 마련이 시급한 지역이다. 또한 도농복합 도시로서 온열질환자들이 많이 발생하는 농경지 면적 비율도 높으며, 도심 내부에 폭염을 가중시킬 수 있는 대규모 산업단지가 복합주거 및 상업지역과 바로 인접하고 있기 때문에 폭염 및 취약계층과 관련하여 시사점 도출이 가능한 지역이라 판단하여 연구대상지로 선정하였다. Landsat-8 위성영상 지표온도를 분석한 결과, 10개 사례일의 평균 지표면온도의 범위는 14.46℃ ~ 42.88℃로 나타났다. 주로 개방되어 있는 지역과 건물 및 인공피복이 분포하는 지역에서 높은 온도가 나타났다(Fig. 1). 청주지역 30 m 해상도의 지표면온도에서 핫스팟을 도출한 결과, 청주공항, 산업단지, 고밀도 주거지역에서 나타났다. 특히 상위 20%에 해당하는 지역들은 오창과학산업단지, 청주 일반산업단지, 오송 생명과학 국가산업단지로 조사되었다. 상위 30%에 해당하는 지역들은 청

주 국제공항, 고밀도 주거상업지역에서 나타나며, 상위 40%에 해당하는 지역들은 그 주변지역에서 나타났다. 본 연구에서는 청주시와 청주시 내에서도 가장 열방출이 높은 청주 일반산업단지를 상세 영역으로 선정하여 폭염대응 시나리오 효과를 분석하였다.

토지피복 유형별 평균 지표면온도 분석 결과, 수목지역과 초지인 곳에서 24℃ ~ 28℃로 나타나며, 건물 및 인공피복 지역에서는 29℃ ~ 30℃로 나타났다(Fig. 2). 토지피복 유형별 평균 지표면온도 순위는 건물, 인공피복, 자연초지, 수목, 수역으로 나타났다. 건물지역에서 표준편차가 1.99로 가장 작은 값을 나타냈는데, 열 방출량의 정도가 높고 일정하다는 것을 알 수 있다. 도로 등의 인공피복 지역에서는 표준편차가 2.43으로 열 방출량의 공간적 변동성이 건물지역보다 크게 나타난다. 인구가 밀집되고 건물이 고밀도로 분포하는 청주 도심지역은 일반적으로 다른 주변지역보다 온도가 높게 나타난다. 낮시간(11시 30분경)에 이처럼 주변의 온도보다 높게 나타나는 청주 도심에서는 주간열섬이 발생한다. 청주 도심과 주변 산림에서의 평균 지표면온도의 차이는 6℃ 정도로 분석이 되었으며, 서울 강남 선릉지역에서도 도시 내 녹지에서의 지표면온도는 건물이 있는 지역과 약 8℃ 정도 차이를 나타내는 것으로 분석되었다(Yi et al., 2017; Kim et al., 2018).

2.2. 미기후 분석모델 PALM

PALM(Parallelized Large eddy simulation Model)은 1997년 최초 버전이 개발되어 현재까지 지속적으로 개발되고 있다. FORTRAN 언어를 바탕으로 구성되어 있으며 모든 병렬구조에 대한 높은 범용성과 성능을 가지고 있다. PALM은 부시네스크(Boussinesq)계의 운동량 방정식과 열역학 에너지 방정식, 그리고 아격자-규모(SGS:subgrid-scale)의 난류 운동에너지와 스칼라 물질에 대한 방정식을 수치적으로 풀고, 다양한 기상, 기후적 현상을 반영한 경계조건 적용이 가능하며, 건물, 지형, 토지피복 자료 등을 사용할 수 있어 실제적인 지형지물의 영향을 고려한 대기현상을 모의 할 수 있다. PALM은 중규모 기상모델부터의 Nesting 및 Coupling이 가능하며, Radiation, Land Surface, Urban surface, Chemistry, Aerosol model 들을 내장하고 있어 다양한 규모의 기상, 기후 현상, 복사, 도시지역 에너지, 식생, 토양, 대기화학적 수송 등의 다양한 현상에 대한 복합적인 조사와 분석이 가능하다. PALM에서는 유체의 흐름을 모의하기 위해서 유체의 운동량과 관련된 방정식을 수치적으로 풀이한다. 방정식은 각각 유체 운동량 보존에 대한 나비어-스토크스 방정식, 열에너지 방정식, 스칼라 수송방정식, 연속방정식으로 이루어져 있다. LES기술을 기반으로 한 PALM은 난

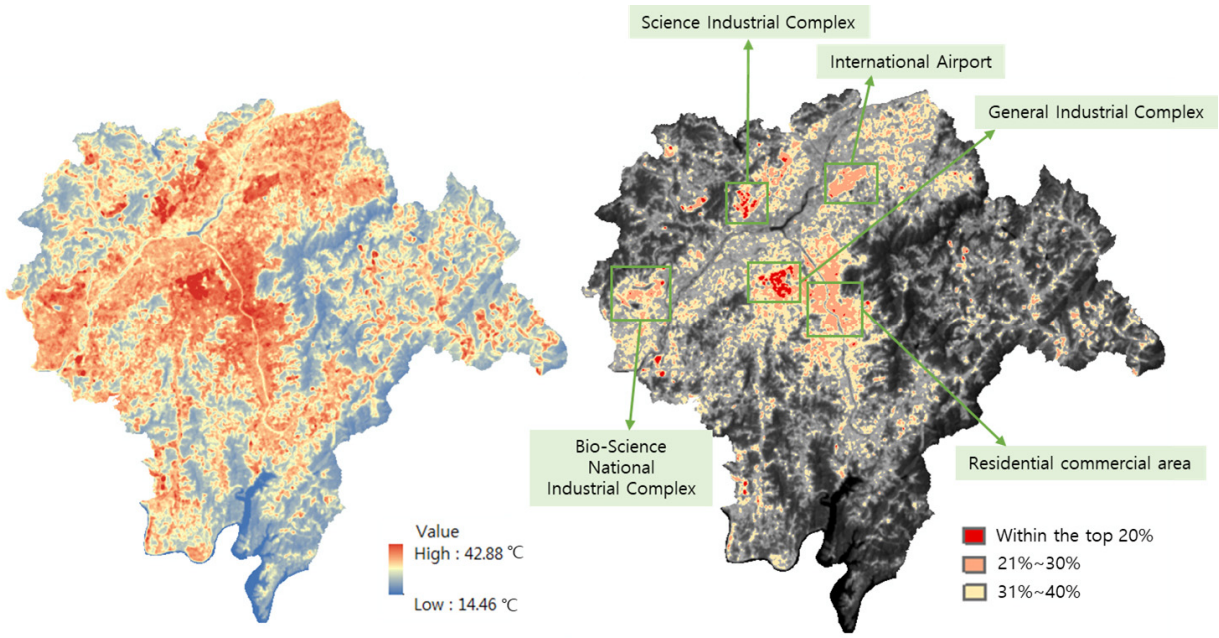
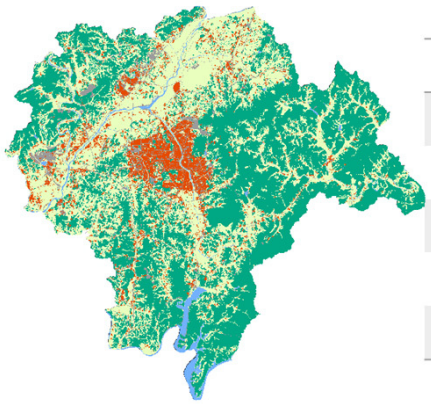


Fig. 1. Average land surface temperature distribution from Landsat-8 for 10 case days (left) and top 20% to 40% region (right)



Land surface temperature (℃)

Value	Color	Count	Min	Max	Mean	Std
Water		23841	14.47	32.18	22.08	3.46
Forest		493265	19.41	37.93	24.44	2.38
Vegetated surface		396258	17.48	39.38	28.27	2.00
Unvegetated surface		53432	18.68	42.33	29.76	2.43
Building area		76566	19.71	42.88	30.69	1.99

Fig. 2. Comparison of average land surface temperature according to 5 types of land cover

류흐름의 규모구분(Scale Separation)을 위해 공간필터(Spatial Filtering)를 사용하고 있고 공간필터를 통해 큰 파장과 낮은 파수에 대해서는 직접 계산을 수행하여 풀이하며 작은 파장과 높은 파수에 대해서는 통계모델을 이용한 모수화를 통해 계산을 수행한다.

도시지역의 상세한 모의를 위해서 PALM이 포함하는 USM(Urban Surface Model)을 사용하여 도시지역의 건물지붕, 벽, 도로 등의 인공구조물에 대한 수평 · 연직 에너지평형을 수치적으로 풀이한다. 도시지표를 구성하고 있는 물질의 열플럭스(heat flux), 현열플럭스(sensible heat flux)의 난류 플럭스(turbulent flux), 도시지표의 표면온도에 대한 수치적 계산·예측이 가능하다. 도시지역과 같은 복잡한 지형특성을 가지는 지역에 대한 PALM 모의 성능을 검증하기 위해 관측자료, 풍동실험 등과 같은 다양한 실험연구가 수행되었다. Park et al.(2015)은 서울을 대상으로 중규모 바람이 고밀도 도시지역의 난류흐름과 환기에 미치는 영향을 조사하였고 중규모 모델인 WRF (Weather Researchand Forecasting)모델의 모의결과를 경계 입력자료로 사용하고 시간변화에 따른 고밀도 건물지역의 난류흐름과 환기를 분석하였다. AWS 관측자료를 사용하여 WRF, PALM 모의 바람을 검증 비교하였고, Wang et al.(2018)은 위성자료를 이용하여 홍콩의 빅토리아 항구 일대의 상세 지형자료를 생성 후, 도시구조물에 의한 풍속 변화를 분석하고 풍동실험결과와의 비교를 통해 정확도 검증을 실시하였다. 장애물이 없는 상층 풍속과 도심지내부의 풍속의 비에 대하여 PALM 모의와 풍동실험 결과를 비교한 결과, 모의결과와 풍동실험간의 상관도가 비교적 높게 나타났다는 것을 알 수 있다. Resler et al.(2018)은 체코 프라하지역을 대상으로 건물벽면과 도로 등의 표면온도를 모의하고 관측자료를 이용하여 모의결과를 비교 검증하였고 그 결과, 태양고도 변화에 따른 지표와 벽면 가열을 관측값과 유사하게 모의하였으며, 도시지표면 가열이 기온에 미치는 영향을 중규모 모델에 비해 실제와 유사하게 모의하였다. Lee et al.(2019)은 서울 강남의 관측망 자료를 이용하여 모델의 정확도를 평가하였으며, 평가지표로 index of agreement (IOA), root-mean-square error (RMSE), normalized-mean-square error (NMSE), fractional bias (FB), geometric mean bias (MG), geometric variance (VG), fraction of simulated data within a factor of 2 of observations (FAC2)을 사용하였고, 이러한 지표들로 산출된 값이 허용기준 범위 이내에 서 유의수준을 보여주었다.

2.3. 시나리오 적용을 위한 모델설계

지형입력자료 변환 자동화 알고리즘을 사용하여 수치표고자료, 토지피복자료, 임상도, 수치건물지도 자료를 영역 D4에 대해 구축하였다(Fig. 3). 도심지 영역인 D4는 20 m 해상도로 480(x) × 480(y) × 120(z)개로 구성하였다. 기상자료는 중규모 기상모델 WRF(Weather Research and Forecasting, Skamarock et al., 2008)와 연계하여 입력되는 체계로 구성하고, 2018년 8월 13일 12시 ~ 15시, 10분 단위로 갱신하며 입력되는 변수는 수평바람성분, 온위, 비습, 토양온도, 토양습도이다. 토지피복자료는 환경공간정보서비스의 세분류 토지피복도를 재분류하여 사용하였고 국토지리정보원의 수치건물지도를 주거지(residential)와 상업·업무지(office) 2가지로 재분류하여 사용하였다. 임상도는 산림청의 자료를 이용하였으며, 임상코드에 따른 잎면적밀도를 구분하였다. 연직 잎면적밀도 함수는 Bonnan

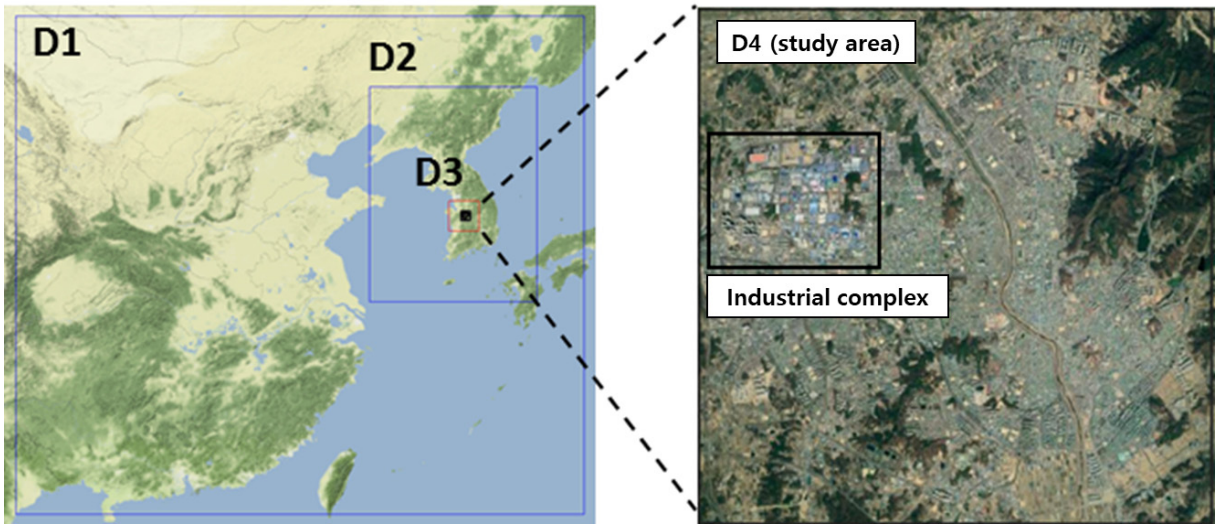


Fig. 3. The composition area of the meso-scale meteorological model WRF (D1~D3) (left) and the area of the urban climate model PALM (right)

Table 1. Model setup for PALM numerical experiments

		Settings
Programming		Fortran 95/2003
Numerical scheme	Discretization in time and space	Finite difference method, Arakawa staggered C-grid
		3th Runge-Kutta
	Parallelization	2-D domain decomposition method
	Advection scheme	5th Wicker and Skamarock(2002)
	Pressure solver	Iterative multi-grid
Physics	Turbulence closure	Moeng and Wyngaard(1988)
	Urban surface	Urban surface model (Resler et al., 2018)
	Land surface	Land surface model (Maronga et al., 2019)
	Radiation	RRTMG, Radiative transfer model (Resler et al., 2018)
	Vegetation	Plant canopy model (Maronga et al., 2019)

et al.(2018)에서 제시된 것을 사용하였고 모델 내부에서 식생에 의한 그림자 효과와 증산작용(Stewart, 1988)이 고려되게 설정하였다. PALM을 이용한 시나리오 적용 설정에 대한 물리과정 반영은 Table 1과 같다. 위 자료로 구축된 지형입력자료는 도시지표면 물리과정을 반영하기 위해 PALM의 분류 카테고리에 맞게 작성하였다(Table 2).

Table 2. Types of urban structures and classifications entered into PALM

Urban surface type	Classification code	Reclassification
Pavement type	2	Asphalt
	3	Concrete
Vegetation type	1	Bare soil
	2	Crops, mixed farming
	3	Short grass
	14	Bogs and marshes
Water type	2	River

규준실험을 포함한 6가지 시나리오에 대해서 동일한 시간 동안 모의를 하였고, 모의된 결과 중 기온과 표면온도에 대한 저감효과를 분석하였다. 또한 열방출이 높게 나타난 산업단지 지역에서 기온, 표면온도, 열환경지수 Universal Thermal Climate Index (UTCI)의 변화를 분석하고 단위격자를 기준으로 하여 온도저감 효과를 분석하였다. UTCI는 기후가 인간에게 미치는 생리적 열부하를 나타내는 지수이며(Gosling et al., 2014), 생기후(Bio climate)가 열 관련 질환에 미치는 영향을 예측할 수 있는 지수로써 UTCI의 효용성은 입증되었다(Napoli et al., 2018). UTCI에 따른 열스트레스 범주는 32℃ ~ 38℃가 강한 열스트레스, 38℃ ~ 46℃가 매우 강한 열스트레스, 46℃ 초과가 극심한 열스트레스를 준다.

2.4. 사례일

도시지역의 상세한 고온 분포 조사를 위해 2018년 8월 13일을 대표적인 사례일로 선정하였다. 해당일은 낮에는 덥고 대부분 맑고 바람이 약한 날이었다. Fig. 4는 2018년 8월 13일 KMA 131 청주관측소의 00시 ~ 23시의 기온, 기압, 바람, 습도의 시계열을 보여준다(Fig. 4). 일일 평균, 최대, 최소 온도는 각각 31.9°C, 37.1°C, 26.7°C로 기록되었다(빨간색). 기상청에서는 본 사례일이 2018년의 전국 평균 폭염일수가 26.1일로 역대 1위 기록인 1994년 25.5일을 뛰어넘었다고 밝혔다. 이는 평년보다 18.2일, 지난 2017년보다 12.7일 증가한 수준이다. 본 사례일은 기온의 일변화가 뚜렷하고 상대 습도 또한 일일 기온의 변화에 반비례하는 것으로 나타났다. 풍속(초록색)은 아침에 약 1 m/s였으며 약 2 ~ 3 m/s로 증가했다. 풍향(주황색)은 일출 전에는 거의 북북서, 북서풍 계열의 불었고 오전에만 잠시 남동풍이 08시 ~ 11시로, 그리고 오후에는 북서풍으로 변경되었다.

3. 폭염대응 기온완화활동 시나리오 선정

3.1. 규준실험(Control case)

폭염대응 기온완화 활동의 효과 분석을 위하여 활동의 적용 전과 적용 후의 열환경 모의가 필요하다. 기온완화 활동 적용 전인 현재 도시지역의 열 환경 현상을 재현하기 위하여 건물형태 자료와 지형고도 자료를 이용하여 도시지역의 형태를 구현하였고, 임상도와 토지피복자료를 이용하여 도시 및 주변지역의 식생효과와 토지이용도 별 열적영향을 고려할 수 있도록 하였다. 도시지역의 열환경에 영향을 줄 수 있는 대표적인 피복특성 요소에 대한 적용 값은 Table 3과 같다.

Table 3. Setting up the model for applying the rooftop greening scenario

	Roof	Wall	Road	Green
Albedo	0.17	0.35	0.18	0.25
Emissivity	0.93	0.90	0.90	0.86
Heat capacity ($Jm^{-1}K^{-1}$)	3.75×10^8	2.11×10^8	1.94×10^8	2.00×104 ($Jm^{-1}K^{-1}$)
Themal conductivity ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0.93	2.10	0.75	10.00 ($Wm^{-2}K^{-1}$)

3.2. 옥상녹화(Green roof)

옥상녹화는 건물 지붕면에 빗물의 저장 및 증발산을 통해 유출량을 줄이고 도시의 열환경 개선과 관련하여 도시기후 개선 및 에너지 절약효과가 있으며, 도시홍수 예방 효과, 미세먼지 저감기능, 공중소음 감소 등의 생활환경 관련 효과가 있다. 본 연구에서는 이용과 관리가 전제되는 녹화시스템인 관리 중량형을 적용하고자 하였고, 지피식물·관목·교목을 활용한 다층구조의 식재를 포함하는 녹화형태로 구성하였다. 모델에 입력자료로 사용되는 건물자료에서 주택외 건물(면적률 52%)에 해당되는 부분의 녹지비율을 0%에서 40%로 변화시켰으며, 녹지면

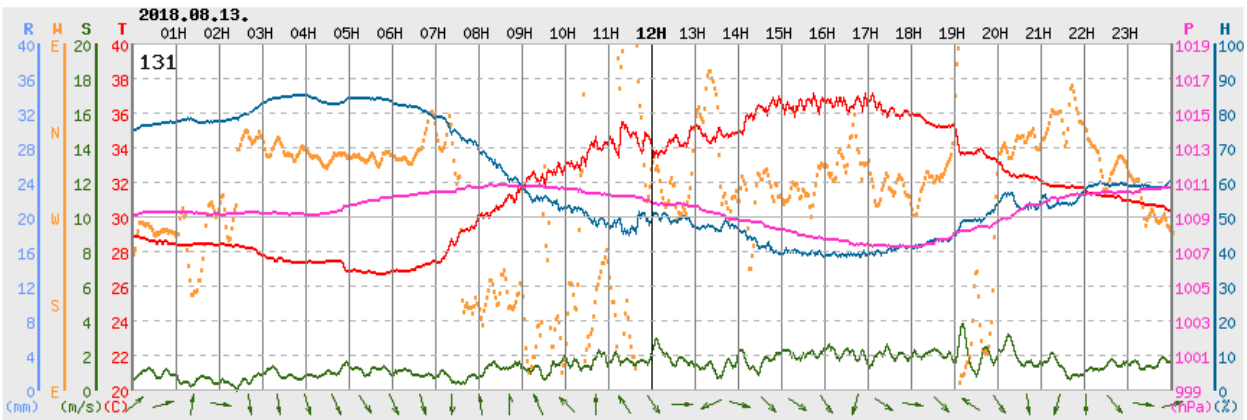


Fig. 4. Weather information on August 14, 2018 (R: rain fall, W: wind direction, S: wind speed, T: air temperature, P: pressure, H: relative humidity)

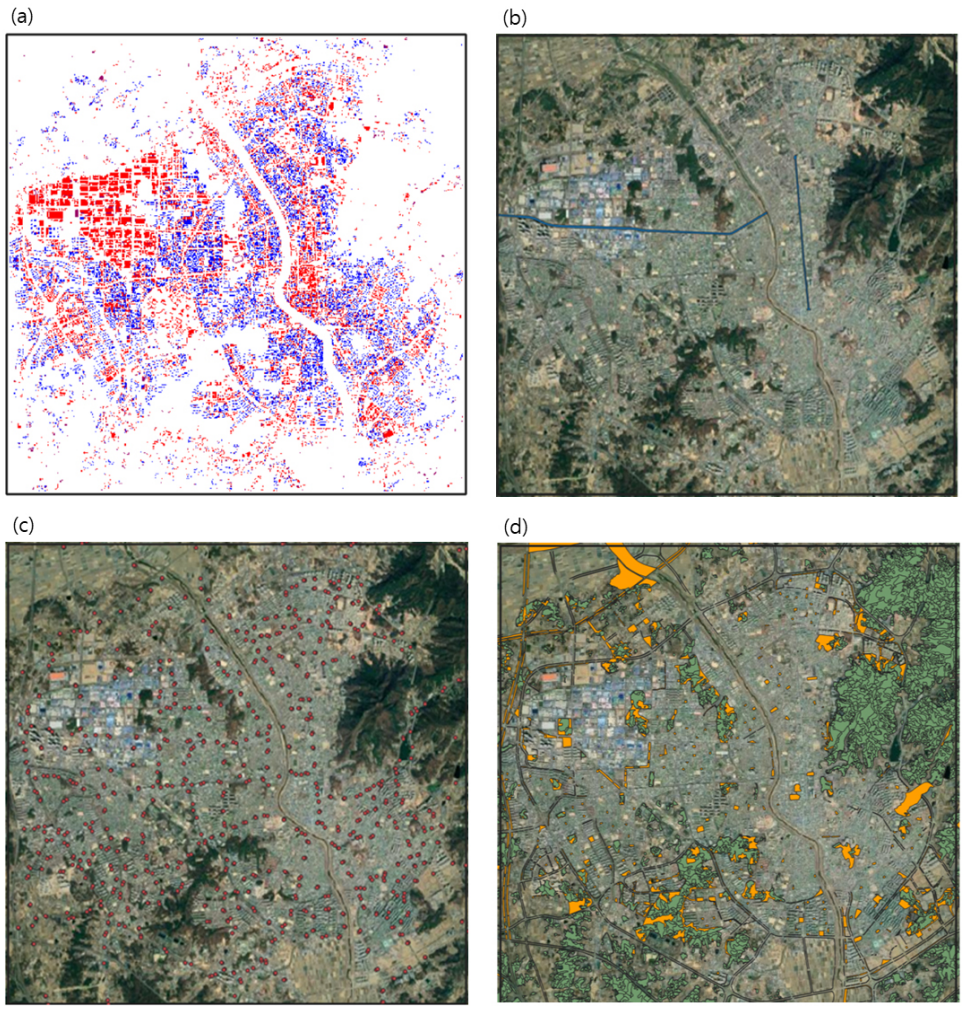


Fig. 5. Scenario of temperature reduction activity factors. (a) classification of buildings for the green roof and cool roof (non-house building: red, housing: blue), (b) Jikji-daero and equivalent street for the clean road, (c) bus stop point for the cooling fog, (d) urban green area (existing green area: green, additional green area: orange)

적에 대해 Leaf Area Index는 1.5 ㎡/㎡으로 설정하였다 (Table 4).

Table 4. Setting up the model of green area ratio for applying the rooftop greening scenario

	Green area ratio	Wall area ratio	Window area ratio	Total
No green roof	0.0	1.0	0.0	1.0
Green roof	0.4	0.6	0.0	1.0

3.3. 쿨루프(Cool roof)

쿨루프는 지붕에 반사율(알베도)이 높은 도료를 칠하거나 반사율이 높은 지붕 자재를 설치하여 건물 옥상의 표면 온도를 낮추는 효과가 있다. 옥상에 흡수되는 열이 낮아지면서 실내온도도 4 ~ 5℃ 정도 낮추는 효과가 있다고 보고되는데, 본 연구에서는 쿨루프 적용실험을 위해, 건물 입력자료에서 주택 외 건물(면적률 52%)에 해당되는 부분의 알베도를 다음과 같이 수정하였다(Table 5).

Table 5. Setting up the model of albedo to apply the cool-loop scenario

	Shortwave	Longwave	Broadband
No cool roof	0.17	0.17	0.17
Cool roof	0.90	0.65	0.77

3.4. 클린로드(Clean road)

클린로드 시스템은 도로 살수장치로써, 도로 중앙에 연계된 노즐을 통해 물을 분사하여 오염물질을 도로 측면 배수구로 세척하여 방출하는 시스템이며, 미세먼지 저감 효과뿐만 아니라 노면온도가 감소하는 열환경 개선효과가 제시되고 있다. 본 연구에서는 청주시의 동서방향의 직지대로와 남북방향의 상당로 지역에 13시부터 14시 1시간 동안 도로면에서의 수막두께를 발생시켜, 클린로드 효과를 적용시켰다. 직지대로와 상당로에 해당하는 부분(Fig. 5b)에 수막두께 증가량을 10^{-5} m/s 로 설정하였고, 수막두께가 10^{-4} m 이상 넘지 못하도록 설정하였다. 수막의 증발은 고려하나, 수막의 자체 온도와 수막의 범람(runoff)은 고려하지 않았다.

3.5. 쿨링포그(Cooling fog)

옥외나 실내의 넓은 공간에 미세 물입자(빗방울의 1/100만 크기)를 분사하여 공기 중 더운 공기와 만나 기화함에 따라 주변 온도를 저감되는 하는 효과가 있다. 주변의 온도를 3 ~ 5℃ 저감하는 효과가 있다고 하며, 유동인구가 많은 횡단보도, 버스정류장, 공원, 경기장 등에 설치하여 시행중이다. 본 연구에서는 청주시 버스정거장에 고정식 쿨링포그 시스템을 설치하여 미스트를 분사하는 시나리오를 적용하였다(Fig. 5(c)). 버스정거장 위치의 지면으로 부터 5 m 위에 액체상태의 안개입자를 분사하고 모의에서 초기 안개입자 크기는 1.5×10^{-6} m이며 주변공기와 열교환이 이루어지면서 시간에 따라 입자크기가 바뀌었다. 10초 마다 각 해당 격자에 1000개의 안개입자를 분사하였고, 각 입자는 생성 후 200초 후에 자동소멸되게 설정하였다. 안개입자가 도메인의 측면경계와 상부(top)경계에 부딪치는 경우는 소멸되고, 지표 및 건물에 충돌하는 경우는 반사되게 설정하였다.

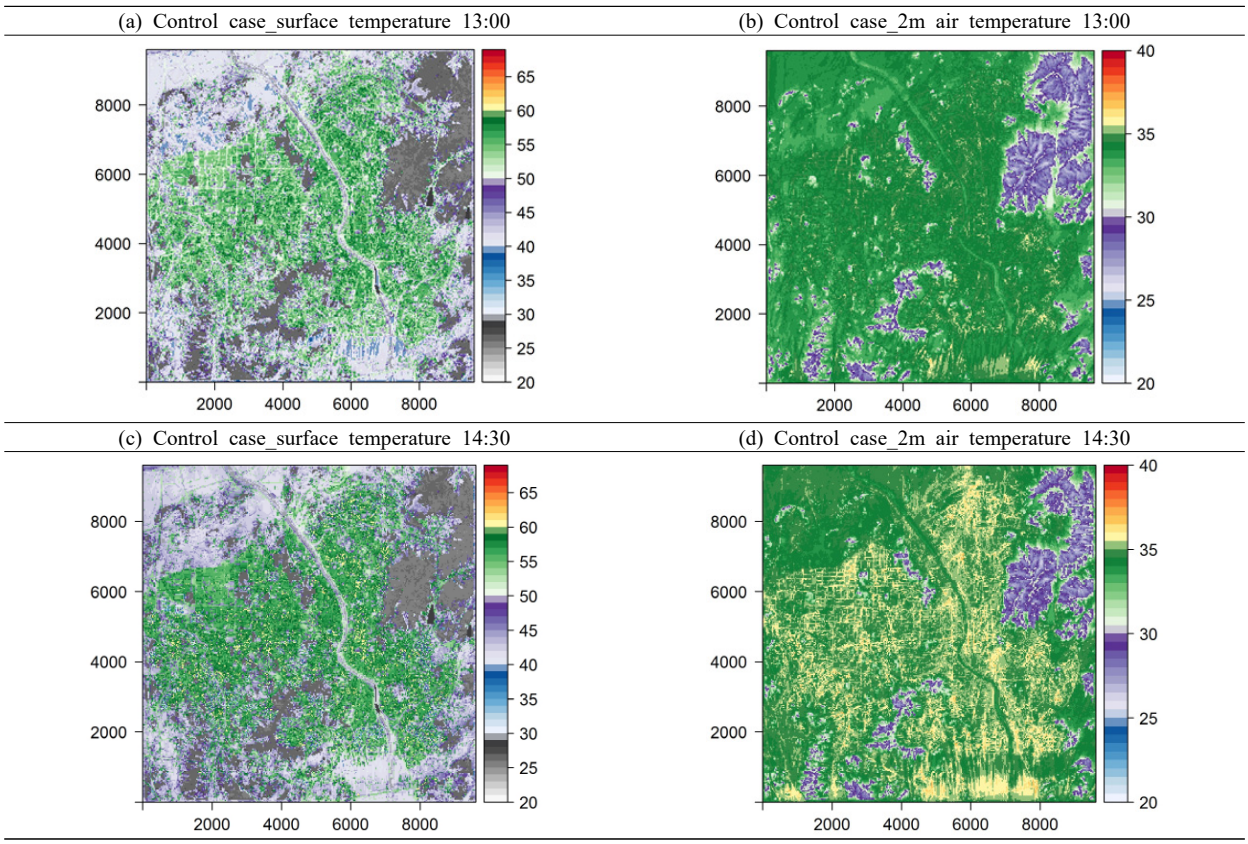


Fig. 6. Surface temperature (left) and air temperature at 2 m altitude (right) of the control case (Unit: ℃)

3.6. 도시녹지 조성(Urban tree)

장기미집행 도시공원(녹지)은 도시공원으로 도시계획시설 결정을 고시한 날부터 10년이 지날 때까지 도시공원(녹지) 사업이 시행되지 않은 도시공원을 말한다. 도시공원은 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」에 따라 도시 자연 경관을 보호하고 시민의 건강, 휴양 및 정서 생활을 향상시키기위해 설치·지정된 도시기반 시설이다. 2020년 장기미집행 도시공원 자동 실효에 따른 도시공원이 일제히 상실될 위기 상황 발생하였고, 1999년 헌법재판소의 사유재산 침해와 관련된 도시계획시설 지정의 헌법불합치 판결에 따라 2000년 개정된 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 의해 장기간 미집행된 상태로 남아있는 공원은 2020년 7월 1일 자동 실효되며, 이를 도시공원일몰제라 한다. 청주시 장기미집행 도시공원(녹지) 부지를 대상으로 녹지조성 시나리오를 적용하였고, 기존녹지(임상도)에 추가된 녹지를 더하여 식생 입력자료를 수정하였다. 추가된 녹지에는 수고 12 m의 활엽수를 적용하였다(Fig. 5(d)).

4. 결과 및 고찰

4.1. 청주 도심지역 대상 시나리오 적용 변화

청주시 도심지역을 대상으로 2018년 8월 13일 12시 ~ 15시 동안 규준실험으로 모의한 결과 중 13시의 지표면온도와 2 m 고도에서의 기온분포를 분석하였다(Fig. 6). 지표면온도의 경우, 도시내부는 50 ~ 60℃로 분포하며, 자연초지나 나지의 경우 35 ~ 45℃, 수목지역은 25 ~ 30℃로 분포한다(Fig. 6(a)). 2 m 고도에서의 기온은 대부분 33 ~ 35℃로 분포하고 수목지역은 27 ~ 30℃로 건물 밀집

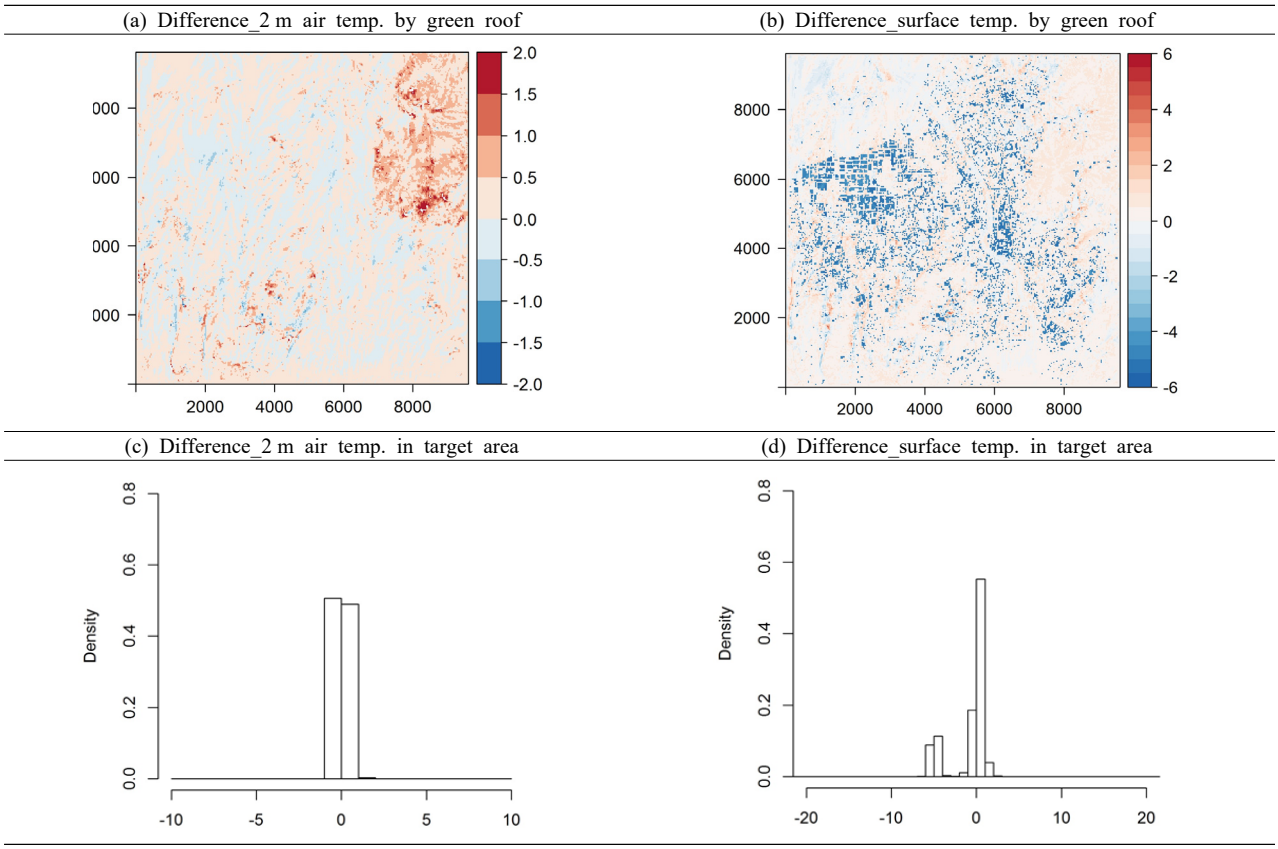


Fig. 7. The difference between the control case and the green roof. (a) the air temperature difference at a height of 2 m from the surface by the green roof, (b) the difference in the surface temperature by the green roof, (c) the histogram of the temperature difference at a height of 2 m in the target area, (d) the histogram of the difference in surface temperature in target area

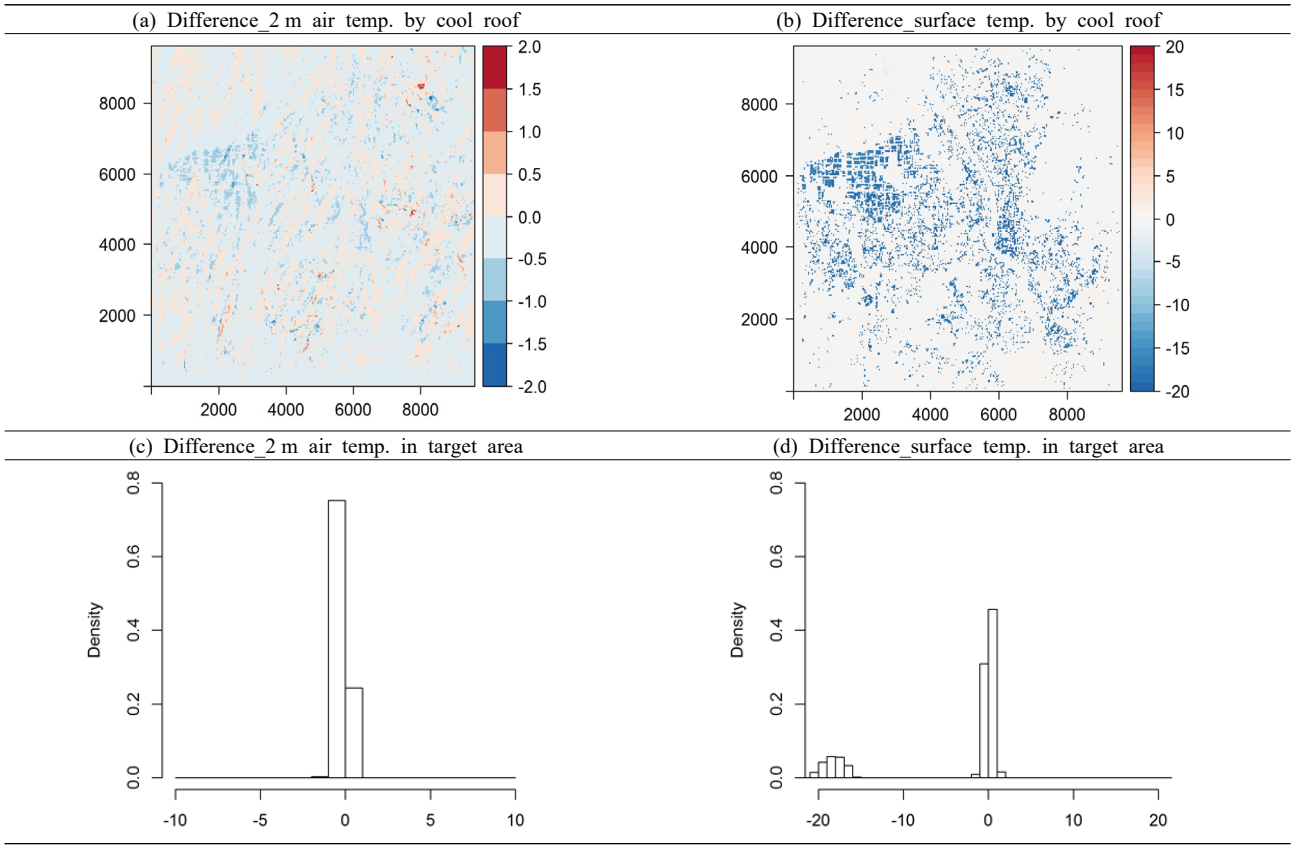


Fig. 8. The difference between the control case and the cool roof. (a) the air temperature difference at a height of 2 m from the surface by the cool roof, (b) the difference in the surface temperature by the cool roof, (c) the histogram of the temperature difference at a height of 2 m in the target area, (d) the histogram of the difference in surface temperature in target area

지역보다 약 5℃ 정도 낮게 분포한다(Fig. 6(b)). 시간에 따른 변화에서 14시 30분경에는 지표면 가열이 증가하게 되고 이로 인한 기온이 36℃까지 증가하게 된다(Fig. 6(c)).

옥상녹화(Green roof)를 적용한 실험에서는 표면온도는 약 7℃ 가량 낮아졌으나, 2 m 고도의 기온에는 ± 1℃로 큰 변화가 나타나지 않는다(Fig. 7). 일반적으로 콘크리트와 옥상녹화의 표면온도의 차이는 여름철 11.2℃까지 차이가 나지만, 기온은 계절 및 기상조건에 따라 그 차이가 다르게 나타난다(Song et al., 2013). 건물옥상면의 재질인 콘크리트는 일사가 시작되고 온도상승이 발생되지만, 옥상녹화 표면에서는 온도상승이 다소 느리고, 이는 녹화된 지역의 낮시간 동안 토양열용량 및 태양의 이동에 따른 수목의 음영 등의 영향으로 나타나는 것으로 보여진다. 주간의 기온분포는 기온이 저감되거나 상승되는 지역들이 함께 나타나(Fig. 7(a)), 옥상녹화의 효과를 판단하기가 어렵다. 규준실험과 옥상녹화 적용실험의 차이(Fig. 7(c))를 보면 그 차이가 양의 값 또는 음의 값이 유사하게 나타난다. 일반적으로 야간에 콘크리트면이 옥상녹화면보다 높은 온도를 나타내는데, 표면온도 감소의 효과로 야간 열섬완화와는 효과가 있으나, 일사량이 최고로 발생하는 여름 주간에는 기온저감 효과가 낮다(Song et al., 2013). 옥상은 주변이 열린 개방된 공간으로 일사의 영향이 크고, 식재된 수목밀집도 및 주변지역 건물과 수목의 유무 등이 영향을 미친다.

쿨루프(Cool roof)를 적용한 실험에서는 쿨루프 적용 후 표면온도가 최대 약 20℃ 정도까지 감소하는 것으로 나타났고, 기온은 큰 변화가 나타나지는 않았으나 상승보다는 저감효과가 많은 것으로 나타났다(Fig. 8). 적용 전과 후에 대한 차이를 히스토그램으로 분석한 결과, 2 m 고도에서의 기온은 0℃ 이하(기온 저감)로 나타나는 지역이 다소 많은

것으로 나타났고, 표면온도의 경우 0℃ 이하뿐만 아니라 20℃까지 저감되는 곳이 나타났다(Fig. 8(c) and Fig. 8(d)).

여름철 도로변 온도저감을 위한 클린로드 적용결과, 표면온도의 경우 약 10℃ ~ 15℃ 정도 저감되었다(Fig. 9). 2 m 고도에서의 기온은 공간적으로 큰 변화가 보이지 않으나, 수치적으로는 해당지역에서 1℃ ~ 2℃의 감소가 나타난다. 적용 전후 히스토그램 분석 결과, 청주 도심 전체지역에서 적용 전후의 차이가 0℃ 이하(기온저감)로 나타나는 지역이 다소 발생하였으며, 표면온도도 감소하는 지역이 더 많게 나타난다. 클린로드가 적용된 타겟지역에서는 약 15℃ 감소한 것으로 나타났다(Fig. 9(d)).

클린로드 적용으로 기온, 습도, 평균복사온도, 풍속의 변화를 조사하고, 이 변수들을 이용하여 인체의 열스트레스 지수인 열쾌적지수(UTCI, Universal Thermal Climate Index)를 분석하였는데, 대부분의 지역에서 강한 열스트레스 등급이 나타났으며, 클린 로드를 적용한 도로에서는 UTCI가 1℃ 내외로 감소하는 경향을 보였다. 정량적으로는 감소하였으나, 열스트레스 등급에 영향을 줄 정도는 아닌 것으로 나타났다. 클린로드 적용은 표면온도를 하강하게 하고, 기온의 저감효과는 있으나 UTCI의 변동은 발생하지 않았다. 이는 주간에 기온은 1℃ 내외로 저감하였지만 UTCI에 영향을 주는 습도증가, 높은 복사온도, 약한 풍속으로 인한 것으로 판단된다.

쿨링포그(Cooling fog)를 적용한 실험에서는 미세한 물방울 입자를 분사시키는 쿨링포그가 생성되는 버스정류장지역에서 기온이 미세하게 감소되는 경향을 나타냈다. 대기 중에 분사하는 방식이어서 표면온도의 변화는 나타나지 않고, 기온의 경우 1℃ 정도 저감된다(Fig. 10). 선행 쿨링포그 연구에서 사방이 밀폐된 지역에서 쿨링포그를 시행했을 때, 기온의 저감은 약 5℃ 정도로 나타났고,

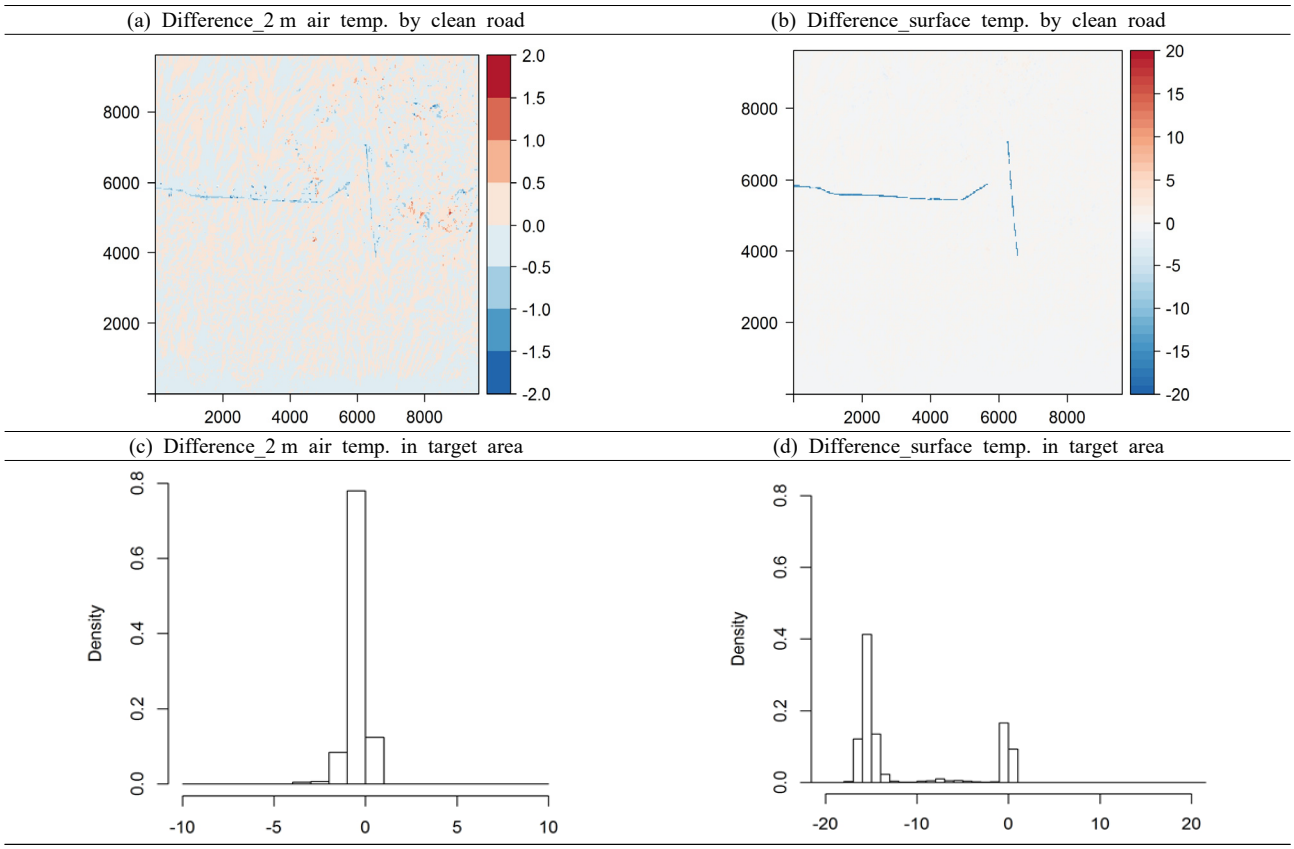


Fig. 9. The difference between the control case and the clean road. (a) the air temperature difference at a height of 2 m from the surface by the clean road, (b) the difference in the surface temperature by the clean road, (c) the histogram of the temperature difference at a height of 2 m in the target area, (d) the histogram of the difference in surface temperature in target area

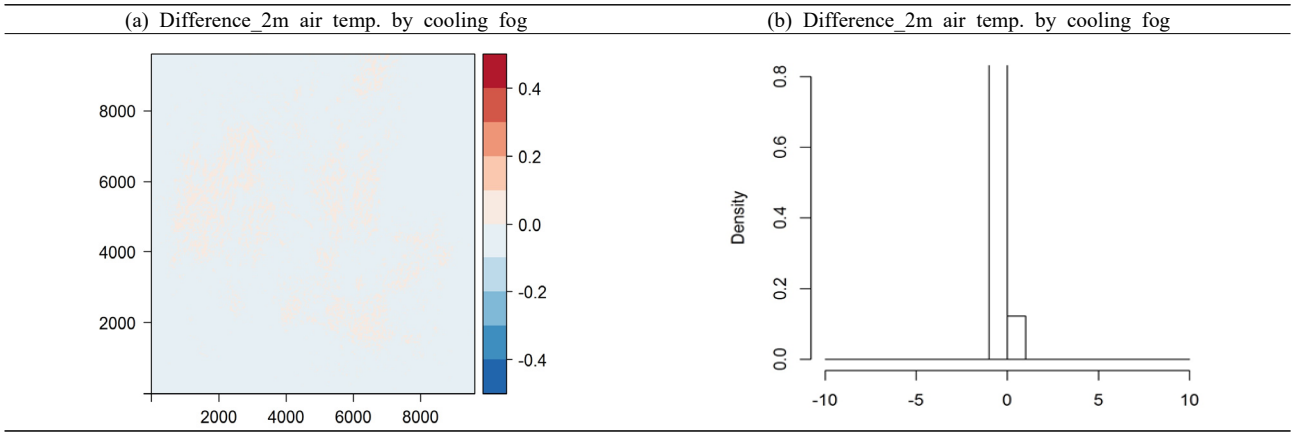


Fig. 10. The difference between the control case and the cooling fog. (a) the air temperature difference at a height of 2 m from the surface by the cooling fog, (b) the histogram of the temperature difference at a height of 2 m

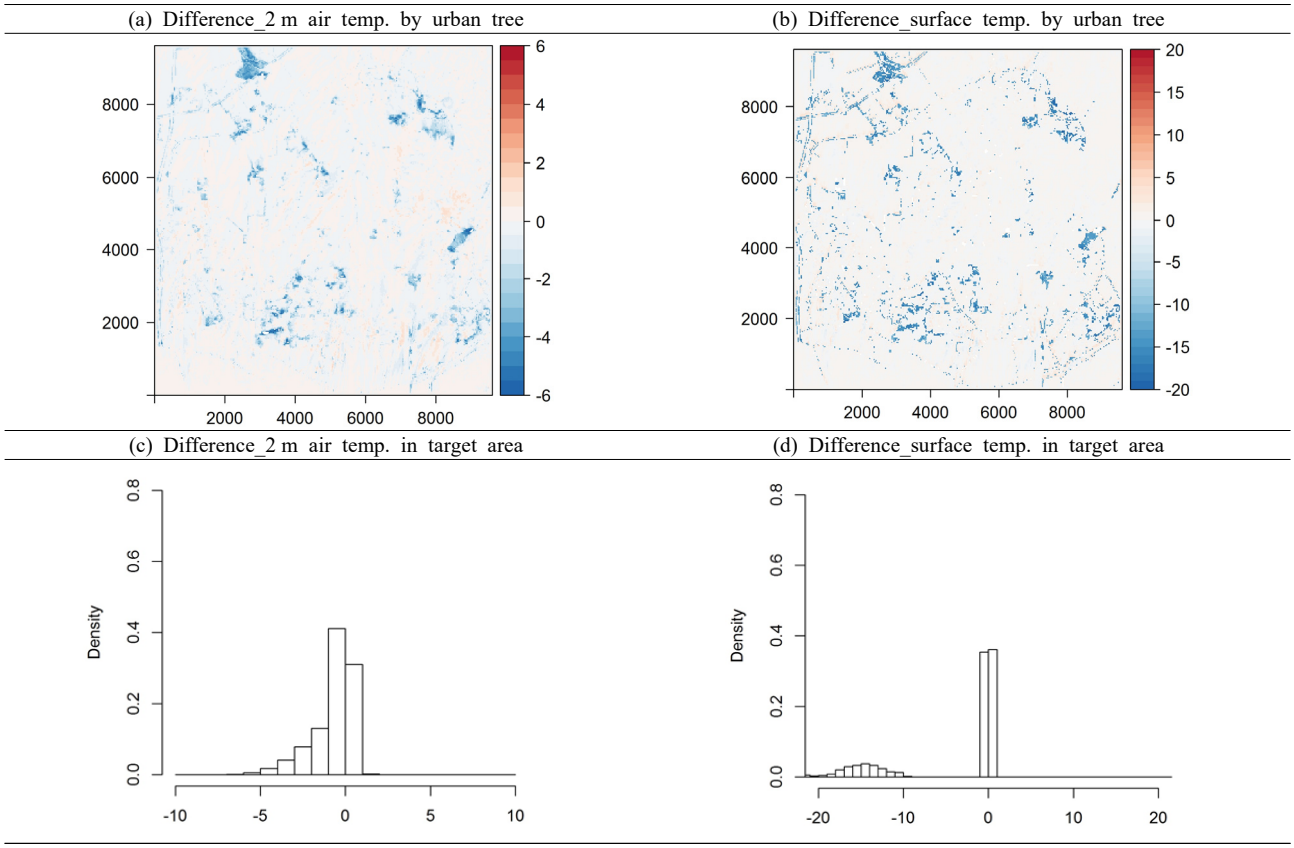


Fig. 11. The difference between the control case and the urban tree. (a) the air temperature difference at a height of 2 m from the surface by the urban tree, (b) the difference in the surface temperature by the urban tree, (c) the histogram of the temperature difference at a height of 2 m in the target area, (d) the histogram of the difference in surface temperature in target area

UTCI의 경우 한 단계 저감되는 효과가 있었다(Montazeri et al., 2017). 그러나 도심 버스정거장에 설치를 하여 분사할 경우에는 대기 중의 수송, 증발 등의 작용으로 그 효과에 대한 검토가 필요하다.

도시지역에 가로수나 공원 등의 소규모 숲(urban tree)이 조성될 경우, 숲이 조성된 지역을 중심으로 기온과 지표면 온도가 낮아지는 효과가 나타났다(Fig. 11). 추가로 숲이 구성된 지역(장기 미집행 도시공원이 녹지로 조성이 되는 지역)에서 기온이 하강되는 효과가 나타났으며, 표면온도는 최대 20℃까지 감소되는 지역이 나타났다(Fig. 11(d)). 숲이 추가로 조성됨에 따라 청주시 전반에 걸친 영향은 약하였으나, 조성된 지역 주변에서는 상대적으로 기온감소 효과가 높게 나타났다.

4.2. 산업단지 대상 시나리오 적용과 UTCI

규준실험에서 폭염일 청주산업단지의 한낮의 보행자고도 기온은 32℃ ~ 36℃ 수준으로 식생지역이나, 주거지역에 비해 상대적으로 높게 나타난다. 청주산업단지 주변지역의 바람의 경우 건물지형을 넘어가는 바람은 3 m/s 이상의 풍속으로 상대적으로 강했으나 도로의 보행자고도 부근에서는 2 m/s 이하의 풍속이 나타난다. 대기이류가 비교적 정체되어 수분속의 수송 또한 제한되어 식생지역 등으로 부터의 수분속 유입도 적을 것으로 판단된다. 청주산업단지는 높은 기온의 분포에 비해 수분, 바람 등의 요소 또한 낮게 나타나고 있어, UTCI가 38℃ 이상인 매우 강한 열스트레스 등급으로 나타난다. 식생 등이 혼재된 주거지역 등에서는 강한 열스트레스와 약한 열스트레스로 상대적으로 등급이 낮게 나타난다.

옥상녹화(Green roof)를 적용한 실험에서는 규준실험 대비 주간에 표면온도의 감소는 있었으나 기온에의 영향은 크게 나타나지 않았으며, 수분속이나 풍속의 변화에도 큰 영향을 미치지 않아 UTCI도 변동이 나타나지 않았다. 쿨루프(Cool roof)를 적용한 실험에서는 전반적으로 기온이 1℃ 내외로 낮아지는 효과가 나타난다. 도로지역의 보행자높이에서보다 건물옥상 부근의 기온이 상대적으로 더 감소하는 경향을 보인다. 비교적 넓은 면적에 기온저감 효과가 나타나 산업단지 대부분 지역에서 UTCI의 감소가 나타났고 위성영상 지표면온도에서도 나타나듯이, 산업단지는 일반적으로 표면온도가 매우 높은 곳이며 쿨루프에 대한 효과를 기대할 수 있다. 쿨루프 시범사업 모니터링 결과, 옥상표면온도는 일반옥상 55.7℃에서 쿨루프옥상 30.3℃로 25.4℃의 저감효과를 나타냈고. 실내온도의 경우, 최대 1.58℃ 감소하고 평균적으로는 0.84℃ 감소하였다(Seoul Cool Roof Standard Introduction Plan, 2017). 한국에너지공단에서는 쿨루프 시행으로 실내온도 1℃당 에너지소비량 7% 감소효과가 있다고 보고하였고 그러나 반사율이 높아 주변지역에서의 눈부심 등 불쾌감에 대한 대책이 필요하다고 제시하고 있다.

클린로드(Clean road) 적용실험에서는 청주산업단지의 직지대로 일대에 물이 살포되어 수막이 발생될 경우, 물이 살포된 도로주변의 보행자고도 기온이 1℃ 내외로 낮아지는 효과가 나타났다. 도로의 기온과 표면온도는 낮아졌지만, 풍속의 변화는 크게 나타나지 않았다. 기온이 낮아져 UTCI에서 1 ~ 2 ℃ 수준의 감소가 있었지만, 수분속등의 증가로 기온감소가 상쇄되어 UTCI의 등급이 낮아질 정도의 효과는 나타나지 않았다. 클린로드 시행은 한낮 도로에 살수를 하기 때문에 기온을 낮추거나 수분을 증가시키는 일시적인 효과가 있으나, 일사량과 복사량이 많은 낮시간에는 시간이 지남(30분 ~ 1시간 후)에 따라 증발에 의해 열환경 개선효과와 지속성이 낮다. 최근에는 차량오염 및 보행자들의 불쾌지수 증가 등의 이유로 한낮의 운영을 지양하고, 일몰 후 야간 도로열섬 대응방안 및 도로 미세먼지 발생에 대한 저감으로 제시되고 있다(Kim et al., 2015).

쿨링포그(Cooling fog)를 적용한 실험에서는 버스정류장마다 쿨링포그를 적용할 시, 쿨링포그가 적용되는 지점과 그 주변의 수분속은 증가하나, 대기의 온도가 뚜렷하게 감소하는 현상은 나타나지 않는다. 그러나 수분속 증가로 인해, UTCI가 35℃에서 30℃로 감소하여 강한 열스트레스 단계가 약한 열스트레스 단계로 변동된 지역이 있는데, 이 곳은 산업단지 내 솔밭공원이다. 녹지가 있는 공원과 주변지역에서 쿨링포그의 효과가 더 높게 발생되며 완전히 개방된 지역보다 다소 밀폐된 공간에서의 효과가 더 큰 것으로 판단된다.

도시 숲 조성 적용실험(Urban tree)에서는 가로수와 녹지면적이 증가함에 따라 전반적인 기온저감이 나타나며 녹지가 추가된 곳의 주변기온은 2℃ 내외로 감소한다. 녹지의 생성으로 인해 풍계에도 변화가 나타났는데, 녹지가 생성된 지역 주변으로 방풍효과로 인해 풍속이 감소하고 기존 건물군 지역에서 감소하던 풍속이 풍계의 변화로 증가하는 경향을 보인다. 기온변화와 풍속변화에 의해 UTCI의 분포가 상이하게 변화하였으며, 새로이 조성된 녹지주변의 특정지역에서는 UTCI가 5℃ 이상 감소하여

열스트레스 단계가 하향되는 지역도 나타난다. 도시 내 숲이 주는 기온저감 효과는 이미 많은 연구들에서 언급하고 있으며, 기온과의 상관관계에서 중요한 식생변수는 수목의 밀도, 높이, 분포면적이 제시되고 있다. 도시와 숲 내부에서의 기온차이는 1℃ ~ 3℃까지 차이날 수 있는데, 숲과 도시의 경계지역에서 낮에는 높은 기온(도시의 기온과 유사)을 나타내지만 밤에는 숲에 의해 냉각되는 효과가 경계지역까지 확산(숲 내부 기온과 유사)이 된다(Yi et al., 2017).

4.3. 시나리오 별 표면온도와 기온의 시간변화

표면온도(surface temperature)는 각 시나리오에 의한 토지피복 변화가 적용되어 산정되었고, 그에 따라 미기후 모델에서의 매개변수의 시간대별 변화가 적용되었다. 규준실험(control case)의 결과에서 표면온도는 모델에서 분류된 각 토지피복의 시간대별 온도가 반영되어 나타났음을 알 수 있다(Fig. 12(a)). 옥상녹화(green roof) 적용은 건물 위 식생 잎면적지수가 반영되어 식생의 증발산 효과들이 고려되었고(Fig. 12(b)), 쿨루프(cool roof)적용은 알베도가 변경된 부분이 표면온도에 반영되었다(Fig. 12(c)). 클린로드는 동서방향 도로에 수막을 형성하여 표면온도에 반영되었고(Fig. 12(d)), 장기미집행된 공원녹지 부지의 자료가 도시공원 및 녹지로써 추가되어 녹지면적의 증가된 부분이 표면온도에 반영되었다(Fig. 12(f)).

2 m 고도에서 기온을 보면 표면온도의 변화로부터 대기에 미치는 영향을 판단할 수 있으며, 각 시나리오 적용에 따른 기온의 저감효과는 1℃ 내외로 나타나고 있다(Fig. 13). 규준실험에서 건물의 옥상면 부근 기온보다 도로면에서의 기온이 더 높은 것을 알 수 있고, 옥상녹화 및 쿨루프 적용 시, 같은 건물 위에 식생관련 변수조정과 알베도 조정을 하였는데, 알베도 조절하는 방법이 해당 지역에서 더 크게 기온감소 효과를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 13(b) and Fig. 13(c)). 도로면에서의 클린로드의 경우, 표면온도의 변화가 가장 크게 나타났고 기온의 변화는 클린로드가 시행된 지역에서는 약 1℃정도 감소하며, 근처에서는 저감효과가 보여지나, 그 주변지역까지의 확대는 나타나지 않았다(Fig. 13(d)). 가로수 및 도시공원 녹지를 적용한 도시 녹지조성 사례에서는 가로수를 따라 표면온도가 저감되는 효과가 나타났고, 기존 공원부지 외에 추가되는 녹지로 인해 녹지의 주변 지역까지 확대됨을 알 수 있다(Fig. 13(f)).

상세 연구영역 산업단지를 대상으로 한 6가지 실험에 대해서, 13시 ~ 14시의 기온과 표면온도의 최소·평균·최대값을 계산하였다(Table 6). 각 시나리오가 적용된 공간적 범위와 면적이 다르기 때문에 서로간에 절대적으로 비교하기에는 제약이 있다. 본 연구에서는 각 시나리오 적용에 대한 온도저감 효과를 분석하고자 하였기 때문에, 적용된 영역에서의 최솟값이 의미가 있으며, 기온 및 표면온도 모두 규준실험보다는 최솟값이 낮아졌음을 알 수 있다.

각 시나리오 적용에 의한 관심지점(노란색 표시지점)의

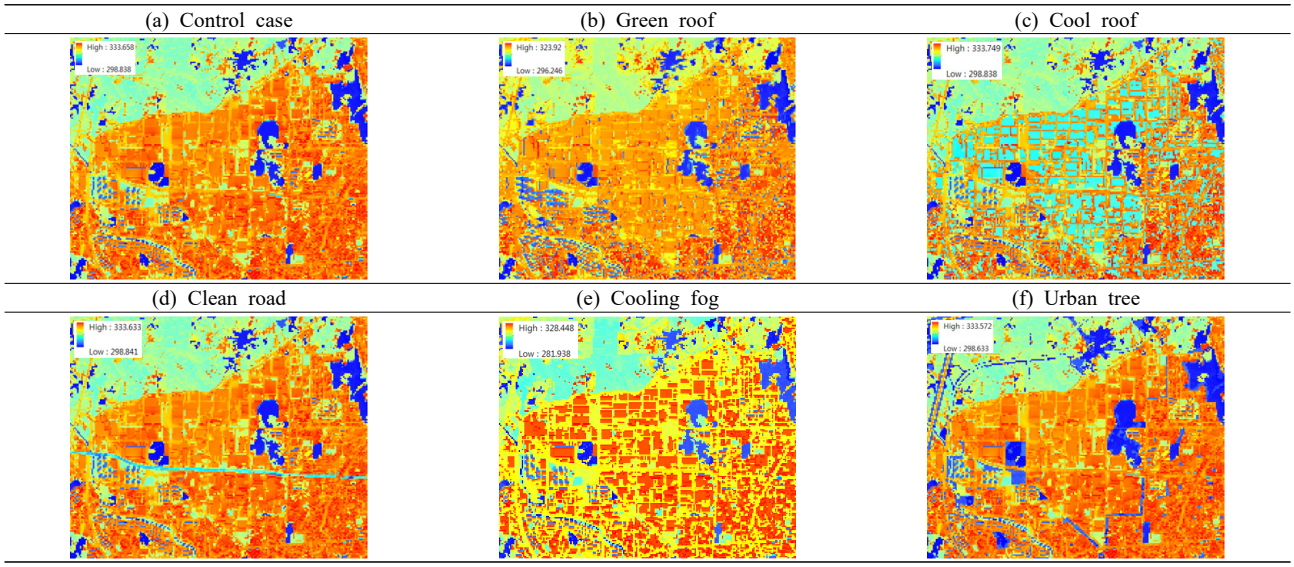


Fig. 12. Control case and scenario applied surface temperature simulation results in the industrial complex area

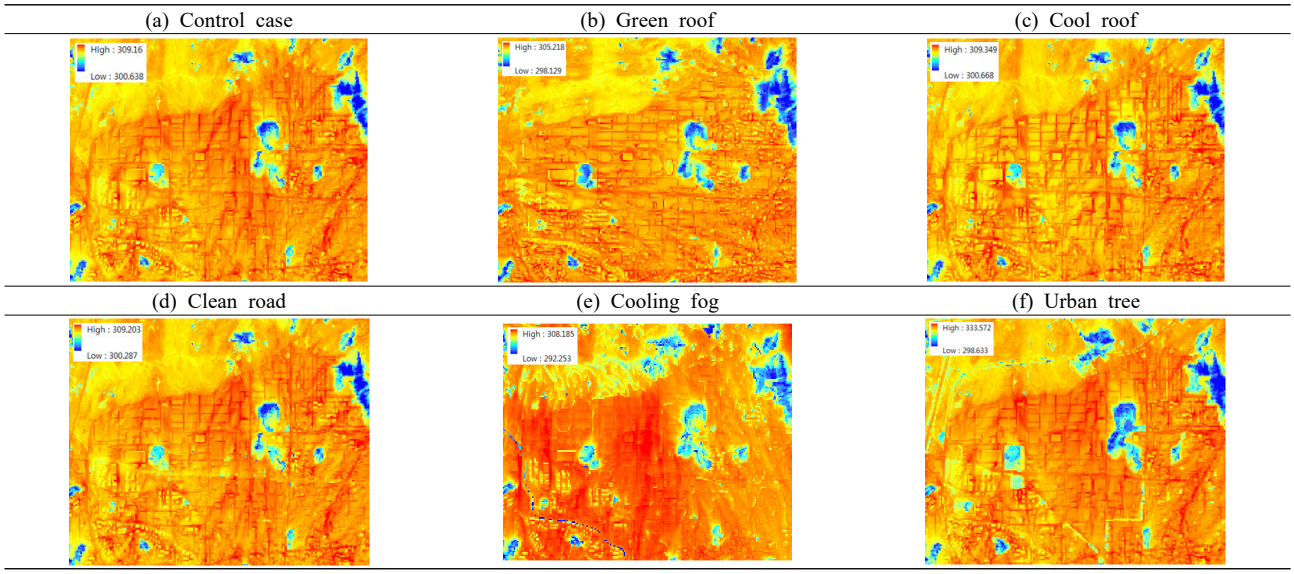


Fig. 13. Control case and scenario applied air temperature simulation results at a height of 2 m in the industrial complex area

12시 30분부터 30분 간격으로 15시까지 기온변화를 분석하였고, 이 시간은 일사와 복사에 대한 영향이 나타나는 시점으로 볼 수 있다. 관심지점은 각 시나리오가 적용된 지점 중 한 격자에 대해서 분석하였다(Fig. 14).

클린로드(clean road)는 12시 30분부터 13시에 일시적인 저감경향은 있으나 시간이 지남에 따라 다소 상승하는 경향을 보이며, 지속되는 일사량과 수막의 증발로 인하여 상승하는 것으로 판단된다. 옥상녹화가(green roof) 적용된 경우에는 모의시간 초기인 12시 30분에 기온저감 효과가 크게 나타났으나 일사와 복사가 많아짐에 따라, 그 상승폭이 크게 나타났다. 쿨루프(cool roof)는 모의 시간 초기 12시 30분에는 낮은 기온을 보이나 시간이 지남에 따라 지속되는 일사와 복사의 영향으로 상승경향을 나타낸다. 쿨루프는 실내의 기온과 함께 비교되어야 그 효과를 더 설명할 수 있다. 옥상녹화와 클린로드보다 기온은 저감되었으나, 시간에 따라 증가하는 경향이 클린로드와 유사하게 나타났다. 일사와 복사의 영향이 커지는 시간임에도 불구하고 그린루프에 비해 기온이 상승되는 폭이 크지 않다. 도시 공원녹지(urban tree)에서는 가장 낮은 기온을 나타내었으며, 기온이 일정하게 유지되는

Table 6. Statistical value of standard experiment and scenario application, Differences between each scenario and control case experiment are in bold (unit: ℃)

	Min. air temperature	Mean air temperature	Max. air temperature	Min. surface temperature	Mean surface temperature	Max. surface temperature
Control case	27.6	34.0	36.2	25.8	48.8	60.6
Green roof	27.1	34.5	36.7	25.2	46.3	60.9
	-0.5	**0.5**	**0.5**	**-0.6**	**-2.5**	**0.3**
Cool roof	26.6	33.8	36.2	25.1	45.4	60.7
	-1.0	**-0.2**	**0**	**-0.7**	**-3.4**	**0.1**
Clean road	27.2	34.0	36.2	24.9	48.6	60.6
	-0.4	**0**	**0**	**-0.9**	**-0.2**	**0**
Cooling fog	27.1	33.8	35.1	25.6	48.1	60.4
	-0.5	**-0.2**	**-1.1**	**-0.2**	**-0.7**	**-0.2**
Urban tree	27.0	33.2	36.2	25.6	47.9	60.5
	-0.6	**-0.8**	**0**	**-0.2**	**-0.9**	**-0.1**

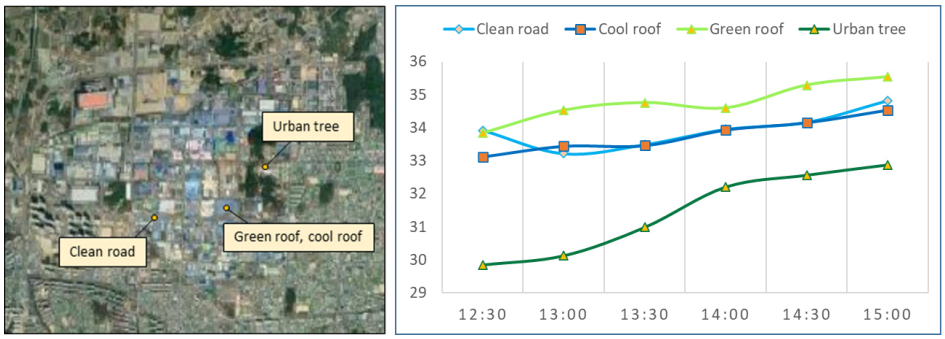


Fig. 14. Time change (1230 LST ~ 1500 LST) of air temperature according to the application of scenarios and points of interest (clean road, cool roof, green roof and urban tree) within the industrial complex

것을 알 수 있다. 본 실험은 가장 높은 기온이 나타나는 시간 12시 ~ 15시로 설정하였는데, 시나리오 적용에 대한 일몰 후의 변화 등의 특성분석을 위해서는 24시간 이상 모의가 필요하다.

4.4. 단위 격자기준 계산결과

각 시나리오가 적용된 면적의 비율에 따라 기온저감 효과를 분석하기 위해, 단위 격자를 기준으로 저감된 기온을 계산하였다. 산업단지의 면 평균 기온차(규준실험-시나리오 적용실험)[℃]는, 아래와 같이 정의하였다(식 1).

Table 7. The difference in surface and air temperature between the control and each scenario application experiment (per unit area 1 m^2)

Scenario	Calculation details	Surface temperature (℃)	Air temperature at 2 m (℃)
Green roof	average temperature difference [℃]	-5.29	-0.17
	area of application [m^2]	1,596,400.00	1,596,400.00
	average temperature difference in industrial complexes area [℃]	-1.26	-0.04
Cool roof	average temperature difference [℃]	-17.85	-0.47
	area of application [m^2]	1,596,400.00	1,596,400.00
	average temperature difference in industrial complexes area [℃]	-4.24	-0.11
Clean road	average temperature difference [℃]	-17.17	-0.81
	area of application [m^2]	122,000.00	122,000.00
	average temperature difference in industrial complexes area [℃]	-0.31	-0.015
Cooling fog	average temperature difference [℃]	-1.32×10^{-5}	-5.53×10^{-5}
	area of application [m^2]	12,800.00	12,800.00
	average temperature difference in industrial complexes area [℃]	-2.51×10^{-9}	-1.05×10^{-8}
Urban tree	average temperature difference [℃]	-13.61	-1.85
	area of application [m^2]	396,400.00	396,400.00
	average temperature difference in industrial complexes area [℃]	-0.80	-0.11

(적용면 평균 기온차) [℃] ×
(적용면적) [m^2] / (산업단지 면적) [m^2] (1)

산업단지를 포함한 연구영역의 계산면적은 6,720,000 m^2 이고, 14시를 기준으로 각 시나리오에 대해 표면온도차와 2 m 고도에서의 기온차를 산정하였다(Table 7). 위와 같이 계산한 결과, 1 m^2 당 감소된 표면온도의 변화량이 가장 큰 시나리오는 쿨루프로 나타났으며, 옥상녹화, 도시 숲, 클린로드 순으로 나타났고 쿨링포그는 매우 약한 결과가 도출되었다. 1 m^2 당 기온저감의 변화량은 쿨루프와 도시 숲 조성이 가장 크게 나타났고, 옥상녹화가 그 다음 순으로 나타났다. 클린로드와 쿨링포그는 기온저감 변화량이 매우 약하게 나타났다. 이 결과는 온도와 관련한 표면온도와 2 m 고도에서의 기온에 대한 결과이며, 효율적인 대응관리를 하기 위해서는 기온뿐만 아니라 복사온도, 습도, 풍속과 함께 이 변수들의 증가 및 감소에 따라 변화되는 열환경지수도 고려하여야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 도시의 폭염 및 열섬대응 활동을 대상으로 개발되고 있는 과학적, 정략적 접근방법을 이용하여 열환경 조사를 실시하고 그 효과를 검토하고자 하였다. 그 방법으로 Landsat-8 위성영상으로 열환경조사하여 핫스팟 지역을 찾고, 고해상도 도시구조를 적용할 수 있는 수치모델을 이용하여 폭염 및 열섬대응 활동 시나리오를 적용하였다. 위성영상 지표면온도에서는 도심 중에서 산업단지부근이 가장 높은 방출량(상위 20%)을 나타냈으며, 청주공항과 주거지역에서도 높은 방출량(상위 30%)을 나타냈다. 단기적 폭염대응으로 시행하고 있는 쿨링포그(cooling fog)와 클린로드(clean road)는 물을 이용하여 일시적인 기온저감 효과를 나타내고 있으나, 일사와 복사량이 증가하는 낮시간 동안 시간지연에 따라 다소 상승하는 경향을 보였다. 클린로드의 경우 모델에서 수막을 발생시켜 기온이 저감되고 30분이 지난 후인 1시부터 모의 종료되는 15시에는 기온이 1.3℃ 상승하는 것으로 분석되었고, 쿨링포그는 기온에 미치는 영향은 작지만 열쾌적지수 UTCI를 한 단계 낮은 수준으로 변화시켰으며, 이는 수분속이 증가(불쾌할 수준이하의 수분)함에 의해 변화된 것으로 보인다. 완전한 개방된 곳이 아닌 곳 또는 공원과 같이 식생이 있는 곳에서 그 효과가 더 큰 것으로 나타났다.

장기적 열섬대응으로 시행하고 있는 그린루프(green roof), 쿨루프(cool roof)는 건물 옥상면의 피복을 변화시킴으로써, 표면온도저감 효과가 나타나는데 쿨루프적용지역에서는 모의시간 초기 12시 30분에 기온저감이 크고 낮시간 일사와 복사량의 증가에도 기온상승이 제일 약하게 나타났다. 옥상녹화(green roof)는 기온저감 효과는 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다. 이 두가지 시나리오에 대한 효용성은 실내온도와 건물에너지 사용량과 분석되어야 한다. 도시열섬 완화 및 건물에너지 사용량 감소를 위해 산업단지에는 쿨루프를, 일반 건물에서는 옥상녹화를 적용하는 등 적절한 조합으로 시행될 필요가 있다. 장기미집행 도시공원 부지에 녹지면적을 증가시켜 도시 숲 조성 시나리오를 적용한 결과 기온저감 효과가 크게 나타났고, 그린루프와는 다르게 주변의 수목밀도가 높고 잎면적에 의한 일사의 차단으로 인하여 지표면에서의 가열이 약하게 일어남으로써 모의시간 초기 12시 30분에 기온이 가장 작게 나타난 것으로 보인다.

청주 도심 내 열스트레스가 가장 높은 상세 연구지역 산업단지를 대상으로 분석한 결과, UTCI를 한 단계 낮은 수준으로 변화시킨 시나리오는 쿨링포그, 쿨루프, 도시 숲 조성 시나리오였고, 청주 도심에서 가장 높은 열방출지역인 산업단지와 그 주변 지역에 이 세 가지 시나리오를 적합하게 시행한다면 도시 열환경, 전기 에너지사용량 등이 크게 개선될 것이다.

본 시나리오 적용실험은 폭염 일 낮시간에 대한 모의결과이며, 한낮의 일사와 복사영향이 크게 작용되어 하루의 일변화 특성을 제시하기에는 한계가 있다. 폭염 기간 도심에서 주로 나타나는 열대야에 대해서도 각 시나리오들이 어떠한 효과를 주는지에 대해서도 분석이 필요하다. 낮시간 저장했던 열이 밤시간에 방출하는 동안, 지표면과 대기사이에서의 물리작용과 각각의 시나리오들이 적용되어 열대야 대응관리를 위한 결과제시가 필요하다. 청주시의 열 취약지역을 진단하고, 열스트레스 저감을 위한 도시활동에 대한 효과를 분석하여 폭염 및 열섬관련 대응정책에 관리방향을 제시할 수 있다. 폭염을 비롯하여 기존 극값을 넘어서는 이상 기후현상이 시민들의 삶에 위험을 미치고 있으며, 그 빈도와 강도는 증가하고 있는 이 상황에 장기적으로 또는 단기적으로 시민의 체감을 높일 수 있는 방법으로 대응사업이 시행되어 폭염정책 체감도를 높일 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 행정안전부 자연재난 정책연계형 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2020-MOIS35-002).

References

Bae MK, Kim B, Yi C. 2020. Analysis on the spatial relationship between the residential area of the vulnerable groups and the hazardous area during the heat wave. Journal of Environmental Policy and Administration 28(3): 243-280.

Bonan GB, E. G. Patton, I. N. Harman, K. W. Oleson, J. J. Finnigan, Y. Lu, and E. A. Burakowski, 2018: Modeling canopy-induced turbulence in the Earth system: a unified parameterization of turbulent exchange within plant canopies and the roughness sublayer (CLM-ml v0). Geosci. Model Dev, 11, 1467–1496, doi:10.5194/gmd-11-1467-2018.

Chae SM, Kim NS, Yoon SJ. 2016. The effectiveness of community public health interventions in alleviating the health impacts of high temperatures. Health Soc Welf Rev, 36(3): 179-203.

Choi JH, Ha JS. 2015. Strategy for Development and Management of a Long-term Heatwave Plan Addressing Climate Change. Journal of Environmental Policy and Administration 14(3): 21-40.

Daegu Metropolitan City. 2018. Daegu Metropolitan City Heat Island and Urban Heat Island Response Ordinance, Daegu Ordinance No. 5189

Di Napoli C, Pappenberger F, Cloke HL 2018. Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI). International journal of biometeorology 62(7): 1155-1165.

Gosling SN, Bryce EK, Dixon PG, Gabriel KM, Gosling EY, Hanes JM, Wanka ER 2014. A glossary for biometeorology. International journal of biometeorology 58(2), 277-308.

Incheon Metropolitan City. 2019. Incheon Metropolitan City Heat Damage Prevention Ordinance. Incheon Metropolitan City Ordinance No. 6260

Kim B, Lee M, Lee D, Kim J. 2020. Study on the Characteristics of Spatial Relationship between Heat Concentration and Heat-deepening Factors Using MODIS Based Heat Distribution Map. Korean Journal of Remote Sensing 36(5_4): 1153-1166.

Kim E, Jeon SW, Lee JW, Park YH, Lee DK. 2012. Local adaptation plan to climate change impact in Seoul: Focused on heat wave effects. Journal of Environmental Impact Assessment. 21(1): 71-80.

Kim D, Yu JJ, Yoon JH, Son SW. 2019. Analysis of urban surface temperature change during heat wave using UAV thermal infrared camera. J. Korean Geogr 1: 47-60.

Kim GH, Lee YG, Kim JH, Choi HW, Kim BJ. 2018. Analysis of the cooling effects in urban green areas using the Landsat 8 satellite data. Korean Journal of Remote Sensing 34(2-1): 167-178.

Kim JS, Kim HY. 2020. Analysis on the characteristics of heat wave vulnerable areas using landsat 8 data and vulnerability assessment analysis. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies. 23(1): 1-14.

Kim SR, Jung EH, Kim HD. 2015. Observational study to investigate thermal environment and effect of clean-road system over a broad way of Daegu in summer. Journal of Environmental Science International 24(9): 1171-1180.

Lee G, Cha J. 2019. A Study on Identification of the Heat Vulnerability Area. Journal Of The Korean Society Of Rural Planning 25(1): 67-74.

Lee GJ, Munoz-Esparza, D, Yi C, Choe HJ, 2019. Application of the cell perturbation method to large-eddy simulations of a real urban area. Journal of Applied Meteorology and Climatology. 58(5): 1125-1139.

Maronga B, Coauthors. 2019. Overview of the PALM model system 6.0. Geosci. Model Dev. Discuss, 1–63.

Metropolitan Air Environment Agency. 2014. A study on establishing guidelines and management measures for

clean road systems in the metropolitan area.

Ministry of Environment. 2020. Practical guide to installation and management of heatwave response facilities for climate change adaptation.

Moeng CH, Wyngaard JC. 1988. Spectral Analysis of Large-Eddy Simulations of the Convective Boundary Layer. Journal of the Atmospheric Sciences 45(23): 3573-3587.

Montazeri H, Toparlar Y, Blocken B, Hensen J.L.M. 2017. Simulating the cooling effects of water spray systems in urban landscapes: A computational fluid dynamics study in Rotterdam, The Netherlands. Landscape and Urban Planning 159. p. 85-100

Park, S. B., Baik, J. J., & Lee, S. H. 2015. Impacts of mesoscale wind on turbulent flow and ventilation in a densely built-up urban area. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54(4), 811-824.

Resler J, Geletic J, Krc P, Belda M, Benesova N, Jurus P, Lopata J, Vlcek O, Damaskova D, Eben K, Derbek P, Maronga B, Kanani-Sühring F, Salim M. 2018. An urban surface scheme for the urban microscale model PALM4U model development and first validation. Proceeding of the International Conference of Urban Climate.

Seoul Cool Roof Standard Introduction Plan. 2017. https://opengov.seoul.go.kr/sanction/10843384.

Song BG, Park KH, Kim GA, Kim, SH, Park GU, Mun, HS. 2020. Analysis of relationship between the spatial characteristics of the elderly population distribution and heat wave based on GIS-focused on Changwon city. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies. 23(3): 68-84.

Shin D, Lee NY, Cho YS. 2015. Analyzing mortality rate and social costs of climate vulnerable groups caused by heat waves in Korea. Journal of Environmental Policy and Administration 14(1): 3-32.

Sim HY, Ju B, Yun SJ. 2020. A study on heat wave vulnerability mapping based on efficiency and equity - focusing on an optimum location choice for coolingfog in Seoul. Seoul Urban Research. 21(4): 41-63.

Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Wang W, Powers JG. 2008. A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical note −475+STR.

Song JH, Lim JH, Kang SR, Song SY. 2013. Analysis on Reduction Effect of Heat Island for Green Roof Systems in Urban Area. Proceedings of the Korean Society for Solar Energy Conference, p. 87-90

Stewart JB. 1988. Modelling surface conductance of pine forest. Agricultural and Forest Meteorology 43: 19-35.

Wang, W., Xu, Y., Ng, E., & Raasch, S. 2018. Evaluation of satellite-derived building height extraction by CFD simulations: a case study of neighborhood-scale ventilation in Hong Kong. Landscape and Urban Planning, 170, 90-102.

Wicker LJ, Wicker LJ, Skamarock WC. 2002. Time-Splitting Methods for Elastic Models Using Forward Time Schemes.

Yang HJ, Yi C, Bae MK. 2019. The analysis of road surface characteristics for road risk management in heat wave: focused on Cheongju city. Journal of Environmental Policy and Administration 27(3): 51-73.

Yi C, Shin Y, An SM. 2017. A study on a comparison of sky view factors and a correlation with air temperature in the city. Atmosphere 27(4): 483-498.