

도시의 지표형태학적 특성에 기반한 지면미기후 분석: 기온추정 및 평가

이채연^{1)*} · 안승만²⁾ · 김규랑³⁾ · 권혁기¹⁾ · 민재식¹⁾

¹⁾한국외국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단, ²⁾국토연구원 주택·토지연구본부, ³⁾국립기상과학원 응용기상연구과

(접수일: 2016년 6월 13일, 수정일: 2016년 8월 23일, 게재확정일: 2016년 9월 19일)

Surface Micro-Climature Analysis Based on Urban Morphological Characteristics: Temperature Deviation Estimation and Evaluation

Chaeyeon Yi^{1)*}, Seung Man An²⁾, KyuRang Kim³⁾, Hyuk-gi Kwon¹⁾, and Jae-Sik Min¹⁾

¹⁾Weather Information Service Engine, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Korea

²⁾Korea Research Institute for Human Settlements, Anyang, Korea

³⁾National Institute Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 13 June 2016; revised 23 August 2016; accepted 19 September 2016)

Abstract Air temperature deviation (ATD) is one of major indicators to represent spatial distribution of urban heat island (UHI), which is induced from the urbanization. The purpose of this study is to evaluate the accuracy of air temperature deviation about Climate Analysis Seoul (CAS) workbench, which had developed by National Institute Meteorological Science and TU Berlin. Comparison and correlation analysis for CAS ATD including meso-scale air temperature deviation, local-scale air temperature deviation, total air temperature deviation, surface heat flux deviation, cold air production deviation among meso-scale numerical modelling variable in ‘Seoul Region’, micro-scale numerical modelling in ‘Detail Region’, and CAS workbench variable using observation data in ground stations. Comparison between night time OBS ATD and CAS ATD show that have most close values. Most of observations (dT_{max} and dT_{min}) have highly positive (dT_{SHB} , dT_{CA} , MD , TD , f_{BS} , f_{US} , f_{WS} , h_B) and negative (f_{VS} , f_{TV} , h_V , Z) correlations. However, CAS workbench needs further improvement of both observational framework and analytical framework to resolve the problems; (1) night time OBS ATD of has closer values in compare with at high rise mountain area and (2) correlations are very dependable to meteorological scale.

Key words: Seoul climate, urban micro-climate, local air temperature, pedestrian thermal environment

1. 서론

콘크리트, 아스팔트 등 인공 구조물과 물, 흙, 나무 등 자연 구조물로 조합된 물리적 공간인 도시에서 생

활하는 도시민들은 다양한 활동을 통해 인공폐열 및 오염물질들을 배출한다. 도시화는 인구집중에 따라 지역사회의에서 나타나는 모든 변화로, 2030년 세계의 도시면적은 현재보다 3배 증가할 것으로 전망하고 있다 (Seto et al., 2012). 이 과정에서 초목 등 자연 지표면은 건물과 도로 등 인공 지표면으로 대체되고, 인공 폐열 등이 증가되면서 독특한 기후가 조성하는데 이를 도시미기후라 한다(Sukkop, 1993; Oke, 2002; Voogt and Oke, 2003). 도시미기후는 도시열섬, 강수패턴 변

*Corresponding Author: Chaeyeon Yi, Weather Information Service Engine, 81, Oedae-ro, Mohyeon-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17035, Korea
Phone: ☎개인정보 표시제한 Fax: +82-31-321-6470
E-mail: prpr.chaeyeon@gmail.com

화, 하강기류, 대기질 변화 등 다양한 현상들로 관측된다(Grimmond et al., 2010).

도시민의 삶의 질을 향상시키기 위한 도시계획을 수립하기 위해서는 도시화 현상과 도시미기후 현상의 상호작용들을 공간적으로 상세하게 이해하는 것이 매우 중요하다. ‘2030 서울도시기본계획’에서 보듯이 우리나라 도시들도 유래 없이 빠르게 진행되고 있는 지구온난화 및 도시화로 인해 발생하는 기후환경문제에 당면해 있다(Seoul Metropolitan Government, 2014). 도시의 회복력을 높이기 위한 정책들을 도시기본계획에 반영하기 위해서는, 지표구조가 야기하는 미기후 효과들을 공간적 분포 변동으로 설명하는 상세한 도시미기후 정보가 필요하다.

도시미기후의 공간적 분포는 복잡한 도시 구조로 인하여 시간적-공간적 변동성이 크게 나타나지만 도시구조, 건물재질, 식생의 양, 인간활동이 유사한 패턴으로 나타날 때 도시미기후 패턴 역시 유사하게 나타나고 있다. 최근에는 토지피복 및 지표구조를 국지기후대(Local Climate Zone, LCZ)로 유형화 하여 도시화와 도시미기후 상호작용에 대한 연구가 진행되고 있다(Stewart and Oke, 2012). 그러나 도시미기후 형성 기작과 공간분포를 상세하게 설명하기 위해서는 거칠기길이(공기 유동 지표), 불투수표면 면적비(열 교환 및 분배 지표), 하늘시계지수(Sky View Factor, 장파와 단파복사 지표), 알베도(복사 흡수 · 방출 지표), 현열플럭스(인공열 방출 지표)와 같은 물리적 속성 지표들이 지표면과 어떻게 상호작용하는지를 정확히 파악하여야 한다. 이러한 배경에서 도시지면모델(Urban Canopy Model, UCM) 및 지면변수 모수화(parameterization)가 수치모델링 분야에서 연구되고 있다(Oke, 1988; Salamanca and Martilli, 2010; Aoyagi and Seino, 2011). 실제 도시의 복잡한 공간구조로 인해 나타나는 도시미기후 영향들을 상세하게 설명하기 위해서는 UCM 역시 충분한 고해상도를 확보하여야 하고, 도시화 과정과 시간에 따른 물리적 상호작용들을 반영할 수 있어야 한다(Yi et al., 2014a). 그러나 현재의 UCM 모델의 개발 수준과 활용 가능한 전산자원에 비추어 볼 때 도시계획 및 환경계획에서 요구하는 상세 미기후정보를 산출하기에는 많은 시간이 소요되고 검증이 어려운 제약이 있다. 따라서 복잡한 도시구조와 도시미기후 특성 중 정량적으로 크고 중요한 부분을 설명할 수 있는 검증된 인자들을 중심으로 고해상도 공간분석모델을 개발하는 연구가 필요하다. 이러한 취지에서 도시미기후에 큰 영향을 미치는 몇 가지 요인들을 중심으로 도시지표면의 분포 특성들을 상세하게 조사하고 도시구조 변화에 따른 미기후 변화를 전망(prognosis)하는 모델들이 계획적 활용을 위해 개발되고 있다(Scherer et al., 1999; Eum et al., 2011). 국내

에서도 국립기상과학원과 베를린공대가 기온편차 등 상세한 미기후분석을 위해 CAS (Climate Analysis Seoul) workbench를 개발하였다(Kim et al., 2014; Yi et al., 2016). Yi et al. (2016)의 연구에서는 분석모델과 관측자료로부터 기온과 상관성 있는 영향 인자에 대한 공간적 특성 고찰이 부족하며, 더불어 서울 외곽지역(은평)의 도시미기후 특성을 서울 도심까지 포괄하여 설명할 수 없기 때문에 강남과 같은 지역을 추가하여 서울의 국지적 도시기후 분포 특성을 기술하기 위한 노력이 필요하다. 이에 본 연구는 서울 도심과 외곽지역을 대표할 수 있는 강남과 은평지역의 고밀도 관측망과 CAS workbench 기온분포 분석결과의 편차 및 상관성을 비교분석하여 분석모델의 정확성을 고찰하고 개선방향을 도출하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 관련 선행연구

지면 근처에서 발생하는 도시미기후 관련 연구들은 크게 (1) 수치모델, (2) 지상관측, (3) 통계모형 세 가지 접근방법을 통해 수행되고 있다(Grimmond et al., 2010). Ryu and Baik (2012)은 WRF-UCM (Weather Research and Forecasting-Urban Canopy Model) (Masson, 2000; Kusaka et al., 2001; Martilli et al., 2002) 수치모델을 이용하여 인공열, 불투수층, 3차원 건물구조 요인이 기온에 미치는 영향을 연구하였고, 토지이용, 도시위치, 계절별 기상조건들이 함께 고려된 분석이 필요함을 언급하였다. Hong et al. (2013)과 Yi et al. (2014b)은 기상청 자동기상관측망(AWS) 자료를 이용하여, 도시 내부의 건물이나 식생분포에 의한 미기후학적 열섬강도 연구를 하였다. Hong et al. (2013)은 서울 AWS 지점들의 주변 건물구조에 따라 국지기후대(Local Climate Zone)를 분류하고, 해당 국지기후대가 갖는 열적특성 정량화를 시도하였으며, Yi et al. (2014b)은 서울 중심으로부터 교외까지 확장하여 AWS 기온 관측 결과를 조사하여 수도권 열섬현상의 원인이 거리(distance)보다 건물, 도로 등 인공 구조물들의 양적 분포와 상관성이 더 높음을 확인하였다. Kim and Baik (2002)은 스펙트럼분석, 다중 선형 회귀분석 등 Canopy UHI (Urban Heat Island) 연구를 위한 통계적 분석방법을 적용해 각 도시에 대한 전일 열섬강도, 풍속, 상대습도, 구름량의 기상변수로부터 최고열섬강도 모형을 개발하였고, Kim et al. (2014)과 Yi et al. (2016)은 모델과 관측자료, Geographic Information System (GIS) 분석을 이용하여 서울 날씨유형 별 공간적 예측모형을 개발하고 활용방안을 제시하였다. 이 연구들은 중규모 측면에서의 기후학적 요소보다 국지

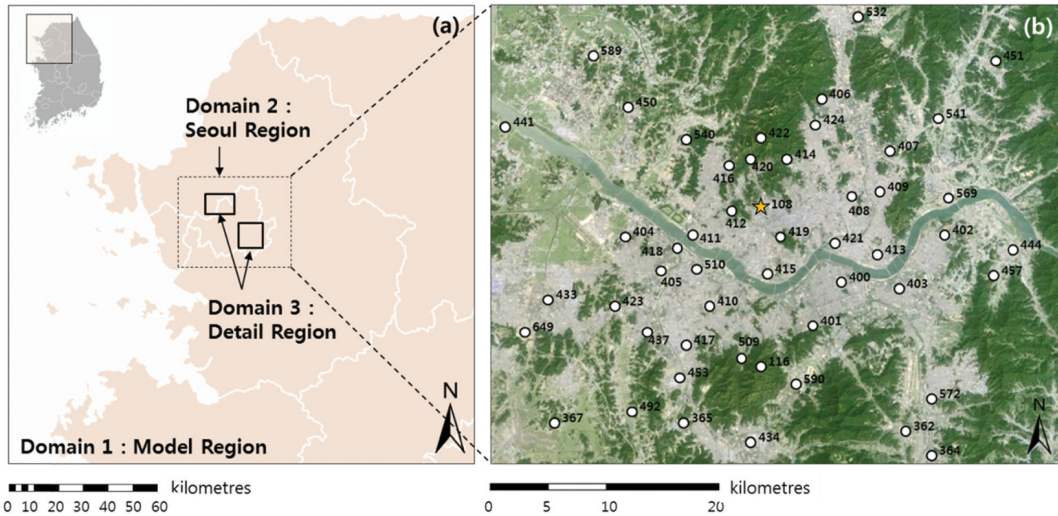


Fig. 1. (a) Three domains for modelling and analyzing, (b) Distribution of AWS observation network (white circles indicate 50 AWS stations and yellow star symbol indicates Seoul weather station for Korea Meteorological Administration in domain 2 (Adapted from Yi et al., 2016).

규모에서 미기후적 측면에서의 기후학적 요소가 도시 열섬 현상에 미치는 영향이 크다고 언급하고 있으며, 그 원인을 도시의 지표의 형태적·물리적 크기의 차이를 통해서 설명한다는 측면에서 공통분모를 가지고 있다.

관측을 통한 도시미기후 공간분포 산출방법은 관측 높이와 대상에 따라, 옥상 위 AWS 기온(air temperature) 자료를 활용한 Canopy UHI 연구와 열적외선(thermal infrared, TIR) 위성영상 기반 지표면온도(land surface temperature) 추정을 이용한 Surface UHI 연구로 나눌 수 있다(Lee et al., 2015). 국내의 Canopy UHI 연구에 활용되는 기상관측장비는 대부분 건물옥상에 설치되어 있어 보행자 높이에서의 열적 스트레스에 대한 국지적 영향을 반영하지 못하며 또한 공간적으로 보면 관측밀도가 수~수십 km 사이로 매우 낮고 분포 역시 불균질하여 상세한 지표면 미기후 변화 및 변동성을 관측하기 어렵다. 이러한 이유로 도시구조에 대한 Surface UHI 연구에는 고해상도 위성영상 자료로부터 획득한 지표면 온도자료가 주로 이용되고 있다(Bhang and Park, 2009; Jee et al., 2014; An et al., 2015). 그러나 위성영상 자료는 시간해상도가 수 시간~수 일 사이로 매우 낮고 기상조건에 따라 관측의 품질이 불균질하다는 단점이 있다.

CAS workbench는 다양한 수평적·수직적, 시간적·공간적 해상도의 도시미기후 정보 수요들을 충족할 수 있도록 절충되고 최적화하기 위한 도구이다(Scherer et al., 1999; Kim et al., 2014; Yi et al., 2016). 즉, 도시

지표 특성들(토지피복, 건물과 지형의 밀폐도·밀집도 등)과 도시지면모수(Urban Canopy Parameter, UCP) (Eum et al., 2011의 Table 5 참조)로부터 분석모델을 적용하여 도시미기후(열 및 바람환경)를 전망하고 이를 사용자가 요구하는 시·공간해상도의 정보 형태로 산출한다(Yi et al., 2011). 신속한 연산을 통해 도시권 규모의 기후분석 정보를 상세한 공간해상도로 산출하기 위하여, 다중규모 수치모델(multi-scale model)과 분석모델(analysis model)이 CAS workbench에 통합되어 있다. 도시 지역의 열 및 바람 영향에 대한 동적인 기상정보 산출은 WRF나 MetPhoMOD (METeorology and PHOtochemistry MODeL)와 같은 수치모델을 이용하고(Eum et al., 2011; Jee et al., 2016; Yi et al., 2016), 상세한 지면근처 도시미기후 정보 산출은 고해상도 지리정보 자료들을 이용한다.

CAS workbench는 유럽의 중위도 도시인 스위스의 바젤의 건축 및 환경 계획 지원을 위한 기후분석지도(Scherer et al., 1999), 남부 독일의 지역기후분석지도(Regionale Klimaanalyse der Region Südlicher Oberrhein (Regional Climate Analysis of the Southern Upper Rhine region); REKLISO; e.g., Parlow et al., 2006), 서울기후분석지도(Climate Analysis Maps for Planning Usage in Seoul; CAMPUS; e.g., Eum, 2008), 스위스 취리히 기후지도(Klima Analyse Stadt Zürich (Zurich City Climate Analysis); KLAZ; e.g., Parlow et al., 2010) 등 여러 도시미기후 분석 경험들이 집약된 유럽의 도시기후분석 방법론을 계승하고 있는 도구로

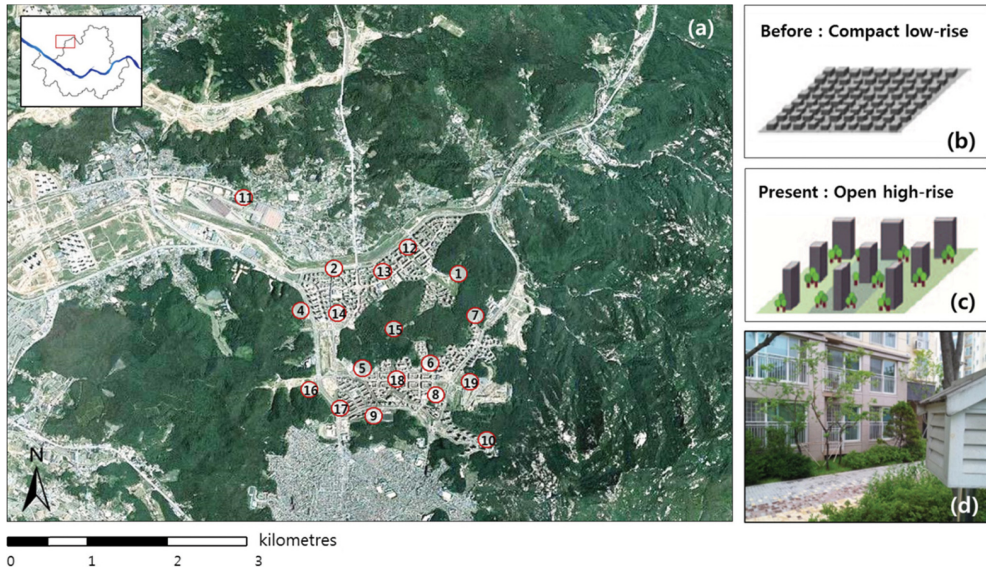


Fig. 2-1. (a) Distribution of observation network in domain 3 (Eunpyeong as detail region), mimetic diagrams for ‘Compact low-rise’ (b) and ‘Open high-rise’ (c), and (d) photo of weather station and circumstances (No. 13).

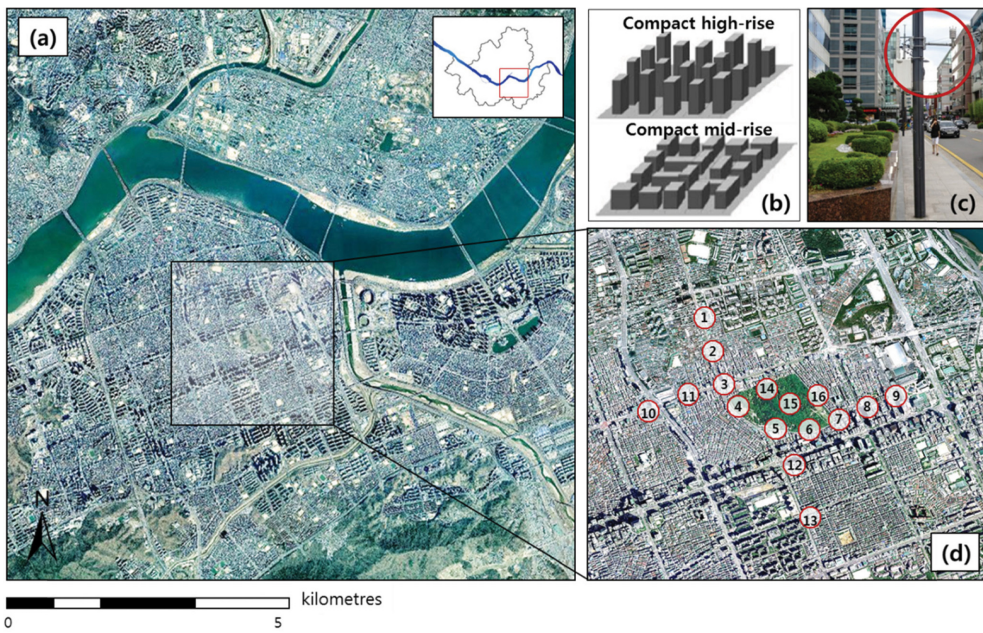


Fig. 2-2. (a) Region for modelling and analyzing in domain3 (Gangnam as detail region), (b) mimetic diagrams for ‘Compact high-rise’ and ‘Compact mid-rise’, (c) photo of weather station and circumstances (No. 9), and (d) high density observation network.

써, 최근에는 시민의 건강과 연계된 생명기상 분야까지 응용범위를 확장하고 있다(Scherer et al., 2013; Kim et al., 2014; Jänicke et al., 2016).

2.2 지면미기후 분석 연구범위

본 연구에서의 주요 연구지역은 서울을 포함한 지역인 기본연구지역(Domain 2, Seoul Region, 50 km ×

Table 1. The spatial information used to build the model input data.

	Domain 1 (Model Region, MR)	Domain 2 (Seoul Region, SR)	Domain 3 (Detail Region, DR)
DTM (Digital Terrain Model)	SRTM (2000), Resolution 90 m	NGII (National Geographic Information Institute) DTM (2002), 1/5000	4 m Resolution MSS Image (2009) (Red : Green : Blue : NIR), KOMPSAT-2
DSM (Digital Surface Model)	SRTM (2000), Resolution 90 m	Seoul city, BIOTOP, GIS Data of Seoul (2010)	Airborne LiDAR Sensor: ALS50 Density: 2.5 point m ⁻² (2009)
LC (Land Cover)	MODIS (2004), Resolution 1 km	Ministry of Environment, Land Cover, GIS Data of Seoul 1/25,000 (2010)	

40 km)과 고밀도 관측이 수행되고 있는 상세연구지역 (Domain 3, Detail Region)인 은평구 뉴타운(8 km × 6 km) 지역과 강남구 선정릉(10 km × 10 km) 지역을 공간적 연구범위로 구성하였다(Fig. 1a). Domain 1은 Model Region으로써, Domain 2의 경계조건 생성을 위해 모의되는 지역이다. 상세연구지역의 은평(DR_EP)은 과거 40년 전에는, Stewart and Oke (2012)에 의해 제안된 LCZ 분류체계 상 1~3층의 저층 건물들이 고밀도로 분포하며 식생이 거의 없는 형태인 ‘Compact low-rise’ 유형이었으나, 2007년 이후 뉴타운이 건설되면서 10층 이상의 고층 건물들이 저밀도로 분포하며, 식생이 함께 있는 투수표면의 형태인 ‘Open high-rise’ 유형으로 국지기후대 유형이 바뀌었다(Fig. 2-1). 은평(DR_EP)과 비교고찰을 하기 위한 다른 상세연구지역인 강남(DR_GN)은 10층 이상의 고층 건물들이 고밀도로 분포하는 ‘Compact high-rise’ 유형과 3~9층의 중층 건물들이 고밀도로 분포하는 ‘Compact mid-rise’가 혼합되어 있는 형태이다(Fig. 2-2).

2.3 관측자료

기본연구지역(Domain2, SR)에는 51개의 기상청 운영 기상관측지점들(108번 종관기상 관측 지점과 50개 AWS 지점)¹이 있다(Fig. 1b). 이 중 108번 서울 관측소는 50개 AWS 관측 결과 비교 기준 및 CAS workbench의 수치기상모의의 초기 기상자료로 사용된다. 108번 서울관측소의 2002년~2011년 관측자료(풍속 및 구름양)가 날씨유형 분류에 이용되었고, 50개 지점 AWS의 기온자료가 본 연구의 관측자료로써 이용되었다. 상세연구지역(Domain3, DR_EP, DR_GN)에서는 건물이나 식생에 의한 미기후 효과를 모니터링 하기 위해 국립기상과학원이 운영하는 은평 뉴타운과 강남 선정릉 지역 관측망 자료를 이용하였다. 이 관

측망은 도시캐노피 내부에서 보행자높이에 초점을 두고 지면으로부터 1.5 m 높이에 설치되었다(Fig. 2). 본 연구의 분석에 사용된 관측자료는 각 영역 지점들의 기온자료이다.

2.4 공간정보 자료

Table 1은 CAS workbench에서 수치기상모의 및 분석모델 구축에 사용된 공간정보 자료들을 보여주고 있다. 상세연구지역 분석모델 입력자료의 경우 국토지리정보원에서 제공하는 항공라이다 자료(점밀도 2.5 point m⁻²)와 한국 항공우주연구원의 KOMPSAT-2 위성 다중분광센서 영상자료(4 m 해상도, 4 Band)를 Yi et al. (2012a)이 제안한 처리기법을 적용하여 건물과 식생에 대해 5 m 해상도로 구축하였다.

2.5 수치기상모의

수치기상모의는 3차원 Eulerian 모델인 MetPhoMod를 이용하여 수행되었다. MetPhoMod는 복잡한 지형의 광화학 시뮬레이션에 적합하며, 500 m 해상도 수치모의가 기온관측과 부합하는 것으로 알려져 있으며 (Perego, 1999) 단방향 네스팅(one-way nesting) 방식으로 MR (2,000 m 격자), SR (500 m 격자), DR (100 m 격자) 세 도메인에 대한 수치기상모의를 수행한다(Fig. 1). Table 2는 세 규모의 모델에 적용된 설정변수들이다. 물리적으로 연속된 대기 경계조건에서 태양복사 및 지면복사에 의한 도시열섬 발달과정을 모의하는데 이상적인 조건으로서 바람이 없는 쾌청한 날(Oke, 1982)을 선정하였으며, 선정된 날의 관측된 기상정보들을 이용하여 수치기상모의의 경계조건을 적용하였다.

2.6 분석모델

2.6.1 중규모 기온편차(meso-scale air temperature deviation, MD)

중규모 기온편차(MD)는 수치기상모의의 결과 중 10

1. http://www.kma.go.kr/weather/observation/aws_table

Table 2. Model configuration and physics used in the MetPhoMod simulations.

Category	Value(s)
Model domain	Domain1 MR: Cartesian grid of 100 × 100 grid points, 2000 m grid spacing Domain2 SR: Cartesian grid of 100 × 80 grid points, 500 m grid spacing Domain3 DR_EP: Cartesian grid of 80 × 60 grid points, 100 m grid spacing Domain3 DR_GN: Cartesian grid of 100 × 100 grid points, 100 m grid spacing
Vertical layers	60 vertical layers between 10 and 6300 m above sea level
Surface properties	Gridded data of surface height, albedo, emissivity, aerodynamic roughness length, volumetric heat capacity, thermal diffusivity, surface temperature and time-constant temperature at 1 m depth
Model physics	Air pressure non-hydrostatic, $k-\epsilon$ turbulence closure, full radiation and soil physics, wind advection, no clouds, no border dampening, no spatial filtering
Time period	Start: 0600 KST 21 June, end: 1800 KST 22 June; first 12 h discarded to remove spin-up effects
Time interval	Regular time steps of 10 s; adaptive time steps down to 1 s
Nesting	One way nesting MR → SR → DR; forcing data from parent domains applied every 15 min
Initial conditions	No wind, i.e. $u = v = w = 0 \text{ m s}^{-1}$ Vertically constant virtual potential temperature = 20°C Vertically constant mixing ratio = 0.4 g kg ⁻¹ Surface temperature provided as spatially distributed values
Lateral boundary conditions (MR)	No wind, i.e. $u = v = w = 0 \text{ m s}^{-1}$ Virtual potential temperature of each vertical layer is set to layer mean value
Output variables	Data storage every 30 min: 3-dim: air pressure-, wind-, and air temperature fields 2-dim: wind-, and air temperature fields at 10 m above the momentum-absorbing surface 2-dim: full set of energy balance components (surface fluxes) and boundary layer variables

m 높이에서의 야간 기온편차 값으로 정의하였으며, 국지규모에서 다루지 않는 일기(日氣)를 포함한 대기 현상을 산출하기 위해 수행되었다. 수치기상모의 공간해상도는 세 도메인에 대해 각각 MR은 2000 m, SR은 500 m, DR은 100 m이며, 이는 각 도메인 별로 모델 입력과 출력해상도(MR은 1000 m, SR은 25 m, DR은 5 m)보다 상대적으로 큰 규모를 나타낸다. 야간평균값 산출을 위해서 2015년 6월 20일 2000 KST에서 6월 21일 0600 KST의 수치모의 값을 평균하여 SR과 DR의 야간 평균으로 사용하였다.

2.6.2 국지규모 기온편차(local-scale air temperature deviation, LD)

국지규모 기온편차(LD)는 대기현상 규모 중 미기상학 부문에 해당하며, 대기와 지표매질 사이, 즉 접지층에서 일어나는 에너지 및 운동량의 교환에 대한 현상을 산출하기 위해 수행되었다. 일기현상을 다루지 않기 때문에, 지형적 특성과 지리적 요인을 반영하여 경험적 통계를 통해 분석모델을 개발하여 산출된다. LD 분석모델은 (1) 지표면으로부터 대기로의 방출 · 유입되는 현열플럭스, (2) 난류혼합에 의한 열 분산, (3) 지

표면 냉각특성이라는 세 요인들이 국지규모 기온에 미치는 영향을 고려한 경험적 모델이다. Christen and Vogt (2004)는 야간 현열 플럭스 밀도와 순복사량에 대한 비율평균이 교외 · 근 교외 · 도시 지역에서 토지피복의 f_{CSAR} (complete surface aspect ratio)에 따라 서로 다르게 나타나는 것을 확인하였다. f_{CSAR} 은 단위면적 당 표면적비($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$)로써, 건물이 없는 경우 '1', 건물이 있는 경우 '1 이상'이 된다. SR의 경우 단위면적인 500 m × 500 m 안에 25 m 해상도 지표특성 격자들, DR의 경우 단위면적인 100 m × 100 m 면적 안에 5 m 해상도 지표특성 격자들이 차지하는 비율과 평균높이를 기반으로 가상화하여 계산된다. 즉, 단위면적인 한 격자의 f_{CSAR} 값은 4개의 벽면과 1개의 지붕면적을 가진 단일 건물구조로 모수화되며 건물점유 정도가 적용된 건물 면적과 평균 건물높이로부터 식 (1)을 통해 추정된다.

$$f_{CSAR} = 1 + 4 \cdot \sqrt{f_{BS}} \cdot \frac{h_B}{d_s} \quad (1)$$

f_{BS} 는 단위격자 내 건물면적 점유비율(fraction)로써 DR의 경우 5 m 해상도 건물(Built-up Surface, BS)격자가 단위면적인 1 ha (100 m × 100 m) 내에 점유하는 비율

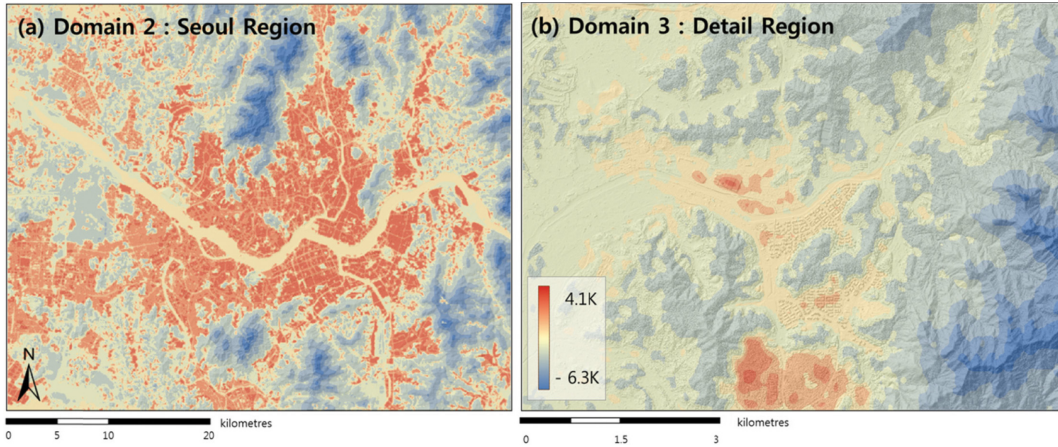


Fig. 3. Total air temperature Deviation (TD) near surface from the SWS reference site by CAS. (a) Domain 2 (Seoul Region, SR) (b) domain 3 (Detail Region, DR_EP).

이다. f_{BS} 를 통해 단위격자의 중심으로부터 인접지역의 토지피복 변화에 따른 국지규모의 영향정도($d_s = 100\text{ m}$)를 반영할 수 있다. 다른 토지유형 면적의 점유비율(f_{TV} , f_{VS} , f_{US} : 식생면적, 자연피복면적, 인공피복면적)도 같은 방법으로 계산된다. f_{CSAR} 값이 증가하는 이유는 야간에 건물표면으로부터 방출되는 현열 플럭스 밀도의 증가(Christen and Vogt, 2004)로 판단된다. 즉 도시의 고밀도 건물지역에서 대기의 가열이 발생하며 이는 식 (2)를 통해 나타낼 수 있다.

$$dT_{SHF} = c_{SHF} \cdot (f_{CSAR} - 1) \quad (2)$$

dT_{SHF} 는 야간 건물표면에서 대기로 방출되는 현열로 인해 국지규모에서 발생하는 기온증가분이며 c_{SHF} 는 경험계수(2K)이다. 건물이 없는 나지($f_{CSAR} = 1$)에서의 기온은 변하지 않는 것으로 간주한다(c_{SHF} 로부터 계산되는 야간 현열 방출에 의한 기온편차(dT_{SHF})는 MetPhoMod 모델링 의해 이미 반영됨). dT_{SHF} 는 수치기상모델로 모의되지 못한 국지규모 기온편차가 야간 UHI 형성에 기여하는 정도를 나타낸다.

난류혼합에 의해 국지규모에서 생성된 열은 주변으로 확산되며 이는 결과적으로 지표 부근에서의 기온 증가를 약화시킨다. 실제로 한 지점의 기온의 증가는 주변의 기온을 증가시키지만 증가하는 dT_{SHF} 는 지표면 열방출 보다 더 작게 나타난다. 이러한 프로세스를 모델에 적용하면, 한 격자의 기온 값은 주변 격자들의 기온 값으로부터 영향을 받게 된다. 따라서 특정 격자와 그 주변 격자들 사이에서의 영향정도를 적용하기 위해 dT_{SHF} 효과에 Convolution 기법(Gaussian low pass filter)을 통해 가중치를 적용한다(Parlow et al., 2006, 42 p. 참조).

국지적 냉각 dT_{CA} 에 의한 기온 하강은 한 시간 동

안 단위면적당 냉각되는 공기의 양(Q_{ca})에 대한 비율로부터 식 (3)을 통해 구할 수 있다.

$$dT_{CA} = c_{ca} \cdot Q_{ca} = c_{ca} \cdot (f_{TV} \cdot Q_{ca, TV} + f_{VS} \cdot Q_{ca, VS}) \quad (3)$$

dT_{CA} 에는 식생과 관련된 수목지역(Tall Vegetation, TV)과 자연피복지역(Vegetated Surface, VS)에서 야간 지면복사 등에 의한 차가운 공기생성으로 인한 기온저감 추정 방법이 적용된다. 여기서는 1 ha의 격자에 대해 계산된 백분위 값 f_{TV} 와 f_{VS} 가 가중되어 적용된다. 차가운 공기생성은 유입되는 태양복사가 TV에 의해 차단되고 또한 식물의 호흡에 의해 잠열로 변환된다고 가정한다. 야간 동안 차가운 공기의 생성을 유발하기 위해 건물지역(Built-up Surface, BS), 인공피복지역(Unvegetated Surface, US)보다 수목지역(Tall Vegetation, TV)과 자연피복지역(Vegetated Surface, VS)에서 잔류하거나 저장되어 있는 열이 더 작다고 가정한다(Yi et al., 2012b). 식생지역 TV와 VS에서 생성되는 차가운 공기의 양, $Q_{ca, TV}$ 와 $Q_{ca, VS}$ 는 시간당 단위면적당 차고 신선한 공기의 양($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)으로써, Mosimann et al. (1999)의 문헌 값으로부터 TV는 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, VS는 $15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 으로 정의하였고, 그 결과인 Q_{ca} 는 경험적으로 냉각팩터(-0.05 K)를 곱하여 온도로 변환하였다. 결과적으로 국지규모 기온편차(LD)는 지표면 수준에서 dT_{SHF} 과 dT_{CA} 의 합으로 계산된다(식 (4)).

$$LD = dT_{SHF} + dT_{CA} \quad (4)$$

2.6.3 종합기온편차(total air temperature deviation, TD)

CAS workbench의 도시기후분석 체계는 중규모 기

Table 3. The criteria of classification of specific weather conditions in Seoul area. Wind speed classes (WSpd: w0, w1, w2) and daily cloud amount (CA: c0, c1, c2; 0~10 scale) for the four seasons were determined based on the daily observed data at the Seoul weather station from 2002 to 2011 (total N = 3652 days) (Cited from Yi et al., 2016).

Class	Weather conditions	Spring	Summer	Autumn	Winter
	WSpd ≤ 25%	WSpd ≤ 2.10	WSpd ≤ 1.77	WSpd ≤ 1.60	WSpd ≤ 1.81
w0	c0 CA ≤ 3	68	33	97	103
	c1 3 < CA ≤ 7	82	69	83	85
	c2 CA > 7	80	124	51	40
	WSpd 25~75%	2.10 < WSpd ≤ 3.18	1.77 < WSpd ≤ 2.65	1.60 < WSpd ≤ 2.50	1.81 < WSpd ≤ 2.88
w1	c0 CA ≤ 3	182	74	197	211
	c1 3 < CA ≤ 7	168	163	157	151
	c2 CA > 7	111	227	98	87
	WSpd > 75%	WSpd > 3.18	WSpd > 2.65	WSpd > 2.50	WSpd > 2.88
w2	c0 CA ≤ 3	83	19	76	124
	c1 3 < CA ≤ 7	63	52	73	66
	c2 CA > 7	83	159	78	35

온편차(meso-scale air temperature deviation, MD)와 추정된 국지규모 기온편차(local-scale air temperature deviation, LD)가 서로 독립된 계(system)라고 가정하고 종합기온편차(total air temperature deviation, TD)라는 개념을 통해 공간에서 발생할 수 있는 기온편차를 각 격자마다 상대적인 값으로 추정한다(Scherer et al., 1999; Eum, 2008; Yi et al., 2016). 따라서 Fig. 3은 앞에서 분석된 중규모 기온편차와 국지규모 기온편차의 합으로 나타난 종합기온편차이며, 식 (5)를 통해 열적부하의 공간분포를 서울관측소를 기준으로 하여 상대적인 수치로 나타낸 것이다.

$$TD = MD + LD \tag{5}$$

2.7 CAS workbench 실험 설계

2.7.1 상세규모 CAS 주요인자와 기온관측 편차 비교

상세연구지역 DR_EP (Fig. 2-1)를 대상으로, 5 m 공간 해상도로 분석된 CAS 주요인자 별 기온편차와 18개 지점 보행자높이(1.5 m)의 관측기온편차(Obs)를 비교 및 고찰하였다. 관측기온편차(Obs)는 18지점의 야간 시간(2007년~2011년 6, 7, 8월 2000 KST~0600 KST)별 자료를 평균한 기온을 이용하였다.

CAS workbench로부터 추정된 주요인자 별 기온편차와 관측지점 별 기온편차를 비교하였다.

2.7.2 CAS 주요인자와 최고·최저 기온관측 편차의 상관분석

기본연구지역(SR)과 상세연구지역(DR_EP)을 대상으로 상관분석을 하여, 관측지점 별 추정된 기온편차와 관측된 기온편차에서 나타나는 차이의 원인을 분석하

고, CAS 주요인자들(모델 추정 결과 및 국지적 특성인 도시 형태학적 건물과 식생관련 변수)이 기온분포에 미치는 영향의 크기를 고찰하였다. 계절 별, 날씨유형 별, 연구지역 별로 그룹화한 관측지점 별 최고기온과 최저기온은 CAS 주요인자(f_{BS} , f_{US} , f_{VS} , f_{T1} , MD, LD, TD, dT_{SHF} , dT_{CA} , h_B , h_{15} , z)들과 상관분석에 이용되었다.

기본연구지역(SR)의 날씨유형 별 자료 분류는 서울관측소(108번 종관기상 관측지점)의 풍속 및 구름양을 기준으로 하였고, 그 중 쾌청하고 바람 없는 이상 기후조건에 가까운 기후적 범위는 백분위수 기준 25% 미만의 풍속과 30% 미만의 운량을 만족하는 날씨를 기준으로 선정하였다. 2002년에서 2011년까지 관측된 풍속자료에 따르면 야간의 백분위수 25%인 수준은 시간평균 풍속 1.68 m s^{-1} 이다. 2002년~2011년 동안 서울관측소에서 관측된 풍속 및 구름양을 이용하여 계절 별 날씨유형을 아홉 가지로 분류하였으며, 상관관계 분석을 위해 그 중 다섯 가지 유형(w0c0, w0c2, w1c1, w2c0, w2c2)이 이용되었다(Table 3).

상세연구지역(DR_EP)의 날씨유형 별 자료 분류는 2007년 3월~2012년 2월까지 DR_EP에서 관측된 자료를 서울관측소의 자료와 비교하여 일 최고기온편차(dT_{max})와 일 최저기온편차(dT_{min})를 계산하였다. SR을 대상으로 상관분석을 먼저 수행하고, DR_EP 지역의 상관분석을 추가적으로 수행하였다.

3. 연구결과

3.1 보행자 높이 야간 기온편차 추정

Fig. 4는 DR_EP 분석 대상지의 CAS 주요인자(MD,

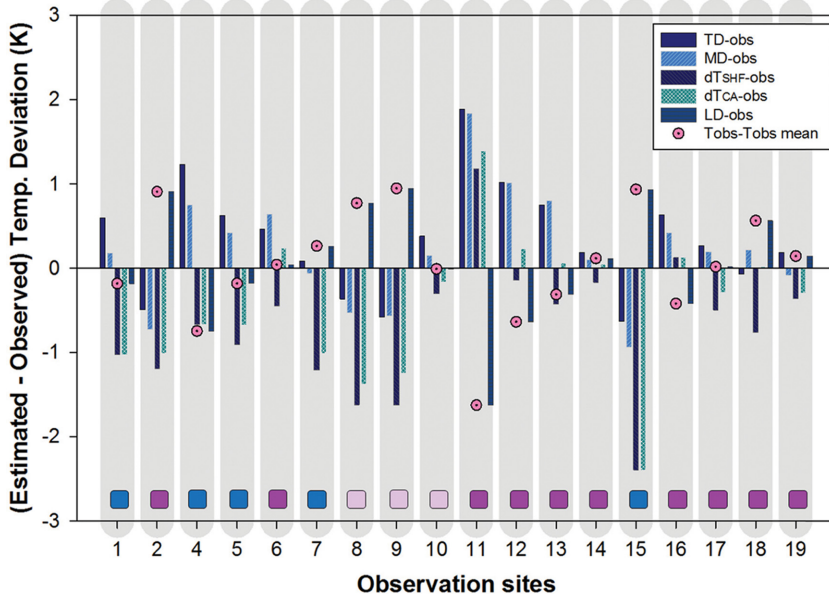


Fig. 4. Differences between estimated temperature deviations through CAS (TD , MD , dT_{SHF} , dT_{CA} , and LD) and the observed temperature deviation from 18 AWS sites in domain 3. Pink circle is differences between air temperature of each sites and mean air temperature of 18 sites. Rectangular shape of the bottom refers to the land cover characteristics in each site (Purple: Building area, Pink: Buildings and vegetation mixed area, Blue: Vegetation area).

LD , TD , dT_{SHF} , dT_{CA}) 별 기온편차들과 18개 관측지점들의 야간 관측기온편차(Obs)들의 차이를 보여주고 있다. 분홍색 원형표시는 18개 관측지점의 기온과 평균 기온의 차($T_{obs} - T_{obs \cdot mean}$)를 지점별로 나타낸 것이며, 범위는 $-1.62 \sim +0.95$ K이다. 대부분 건물지역에서 양의 값이 나타나 지점들 평균보다 야간 기온이 높게 나타남을 알 수 있다. CAS 주요인자 별 기온편차들과 Obs 사이에는 약 $-2.5 \sim +2.0$ K의 차이가 있었다. 그 중 국지규모 기온편차 LD 와 Obs 의 차이는 대부분 작게 나타난 반면, 중규모 기온편차 MD 와 Obs 의 차이는 크게 나타났다. 이는 MD 를 산출하는 모델의 규모 특성상 건물 및 식생 분포 등 지표특성이 기온에 미치는 영향들을 충분히 모의하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 지표특성을 상세하게 반영하고 있는 LD 의 경우 MD 에 비해 Obs 와의 차이가 상대적으로 작게 나타났다. 건물지역에서 관측된 지점들(6, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19번)의 Obs 와 LD (f_{CSAR} 를 통해 산출되는)와의 차이를 보면 약 0.5 K 내외로 MD 와 비교했을 때 매우 작음을 알 수 있다.

Table 4는 CAS 주요인자 별 기온편차들과 Obs 의 차이가 가장 크게 나타난 두 관측지점의 특성들을 상세하게 기술하고 있다. 가장 큰 기온편차의 차이를 보인 관측지점은 15번 지점으로 편차의 차이는 최대 2 K 이상이었다. 이 지점은 이말산 정상(Fig. 2 참조) 식생

지역 안쪽에 설치되어 있어 주변이 숲으로 둘러싸여 있으며 LD 와 Obs 의 차이가 TD 와 Obs 의 차이보다 훨씬 크게 나타났다. 두 번째로 큰 기온편차의 차이를 보이는 지점은 서울메트로 차량기지 근처 11번 지점으로서 편차의 차이는 2 K 이하였다. 이 지점은 주변보다 고도가 낮고 평평한 지역에 위치하며 관측지점 주변이 열려있는 형태이다(두 지점의 지형적 특성과 주변 정보는 Table 4 참조).



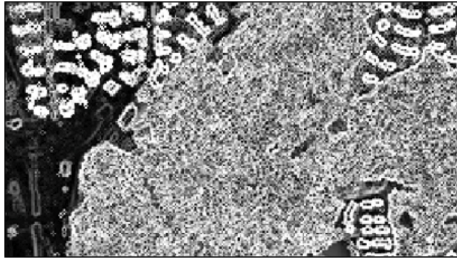

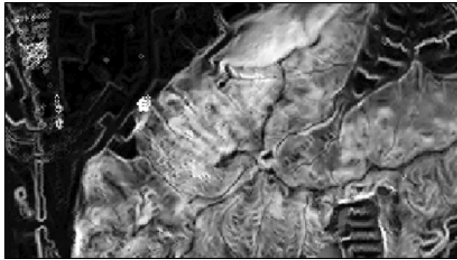
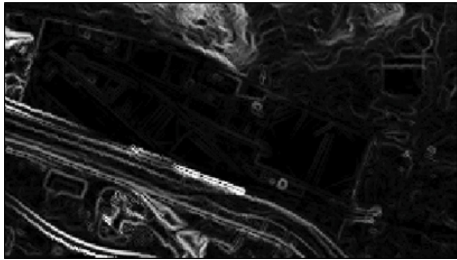
3.2 날씨유형에 따른 일 최고 · 최저 기온편차와 CAS 주요인자의 상관성

날씨유형 별 일 최고·최저 기온편차(dT_{max} 및 dT_{min})와 CAS 주요인자 기온편차들간 상관분석 결과, 지역 규모 SR에서는 중규모 기온편차 MD , 상세규모 DR_EP에서는 CAS 주요인자 중 피복형태의 면적 점유비에 대한 특징이 잘 설명되고 있었다.

3.2.1 SR 실험 결과의 상관관계 분석

R 프로그램(Ihaka, 1998) 환경에서 작성된 Correlation Matrix 그래프는 SR 지역에서 관측한 날씨유형 별 주간 최고기온편차(dT_{max})와 야간 최저기온편차(dT_{min}) 값들과 CAS의 주요인자들(f_{BS} , f_{US} , f_{VS} , f_{TV} , MD , LD , TD , dT_{SHF} , dT_{CA} , h_B , h_V , z)의 상관관계를 보여준다(Fig. 5). 파랑색은 음의 상관관계를, 분홍색은 양의 상관관계

Table 4. The geographical features and information of the 15th sites and 11th sites (in Fig. 2).

	No. 15 (mountain top)	No. 11 (garage of Seoul metro)
Aerial Photo		
The slope of the building and vegetation (0~84.5)		
The slope of the terrain (0~74.3)		
Features of the observation sites	<ul style="list-style-type: none"> · Height of 130 m · Higher than the surrounding region · The forest within a radius of 300 m from the observation site · The slope of the terrain is 30~40 degrees 	<ul style="list-style-type: none"> · Height of 29 m · Lower than the surrounding region (flat area) · Open space from the observation site · The slope of the terrain is 0.2~1.6 degrees

를 나타내며 상관성이 높을수록 명도가 낮은 짙은 색으로 나타났다. ‘x’는 유의하지 않은(p-value ≥ 0.1) 상관성을 나타낸다. 서울관측소를 기준으로 하여 계산된 SR 지역 50개 지점의 주간 최고기온편차(dT_{max})와 야간 최저기온편차(dT_{min}) 대부분에서 양의 상관관계(dT_{SHF} , dT_{CA} , MD , TD , f_{BS} , f_{US} , f_{WS} , h_B)와 음의 상관관계(f_{TB} , f_{VS} , z)가 나타났으며 특히, 표고(z)의 상관관계가 높게 나타나고 있다. MD 와 TD 의 양의 상관관계는 봄, 여름, 가을, 겨울 모두에서 뚜렷하게 나타났다. 주간과 야간의 상관성 비교에서는 dT_{max} 가 dT_{min} 보다 뚜렷한 상관성을 보였다. 이는 SR에서 주간에 가열된 국지적 기온상승 효과가 야간에 지표면의 냉각으로 인한 기온하강 효과보다 기온편차에 더

큰 영향을 미치기 때문이라고 판단된다. SR 전반에서 dT_{min} 이 dT_{max} 보다 상관성이 낮았지만, 수역 면적 비율 f_{WS} 의 경우 dT_{min} 이 dT_{max} 보다 높은 상관성을 나타낸 것으로 보아, 야간 기온에 수역의 영향이 높다고 판단된다.

3.2.2 DR_EP 실험 결과의 상관관계 분석

DR_EP 역시 dT_{max} 과 dT_{min} 는 dT_{SHF} , dT_{CA} , MD , TD , f_{BS} , f_{US} , f_{WS} , h_B 와 양의 상관관계, f_{TB} , f_{VS} , z 와는 음의 상관관계를 나타냈고, 고도(z)와는 상관성이 매우 약하게 나타났다(Fig. 6). 주간과 야간의 상관성 비교에서는 dT_{SHF} , dT_{CA} , TD , f_{US} , f_{TB} , h_B 가 dT_{min} 보다 dT_{max} 에서 더 크게 나타났다. 특히 여름철 f_{US} 와 주간 dT_{max}

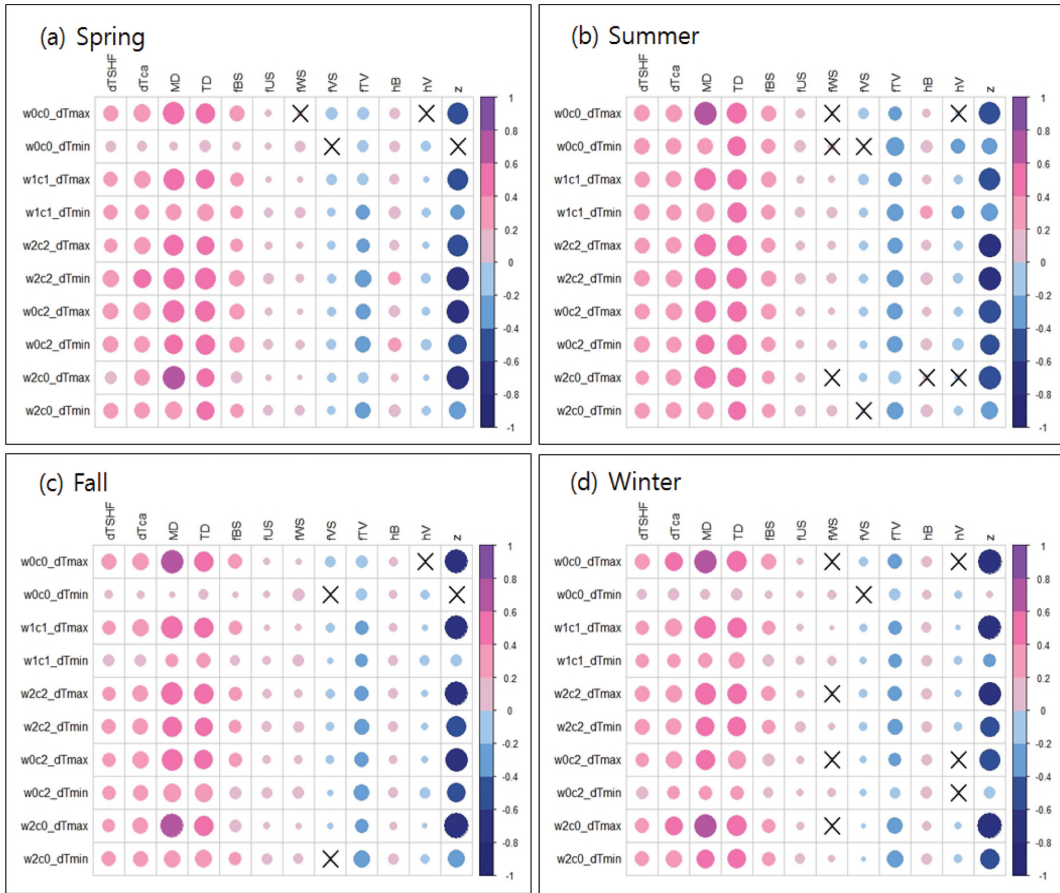


Fig. 5. Correlation coefficient scale matrix between the CAS output variables and the temperature deviations (dT_{max} and dT_{min}) from the Seoul Weather Station reference site at the 50 sites in the SR.

의 상관성이 높았으며, 이는 주간에는 도로나 주차장 같은 포장된 불투수 지면에서 방출된 현열을 주요 원인으로 설명할 수 있다. 현열의 증가가 주변의 대기를 가열시켜 기온편차를 증가시키는 것으로 판단된다. 반면에 f_{BS} 는 dT_{max} 보다 dT_{min} 에서 상관성이 더 높게 나타났다. 이는 건물면적 비율이 클수록 야간 기온편차가 증가하는 것으로 설명할 수 있으며, 주간에는 저장되어 있던 열에너지가 야간에 방출되는 현상이 반영된 것으로 판단된다. 계절별 비교에서는 여름철 상관성이 가장 높게 나타났는데, 이는 주로 식생(dT_{CA} 와 f_{TV})에 의한 기온저감 효과와 관련이 있을 것으로 판단된다. 야간의 차가운 공기 생성에 의한 기온저감 설명변수인 dT_{CA} 는 dT_{min} 보다 dT_{max} 와의 상관성이 높게 나타났다. 식생의 활동이 활발한 여름에는 f_{TV} 가 높을수록 도시림 캐노피에 의한 주간 태양복사 차단, 증발산의 효과가 커지기 때문에 dT_{max} 와 f_{TV} 의 음의 상관성이 크게 나타난 것으로 판단된다.

4. 요약 및 제언

도시화는 필연적으로 도시열섬을 야기한다. 그러나 도시열섬을 설명할 수 있는 원인은 지역의 특성에 따라 크게 달라지며, 지역적 기온편차는 미기후(microclimate) 특성에 의해 발생하는 공간적 기온분포 차이를 설명하는 지표이다. 이 연구에서는 서울 및 주변 지역에서 나타나는 기온편차를 도시열섬을 설명하는 대표성 있는 지표로 보고 지역규모(SR) 및 상세규모(DR_EP)로 나누어, 관측자료 기반 기온편차와 CAS 주요인자 기반 기온편차의 차이를 비교하고 상관성을 검토하였다. CAS workbench는 도시화로 인해 발생하는 토지피복 변화가 지면미기후에 미치는 영향들을 MD, LD, TD, dT_{SHF} , dT_{CA} 등 여러 요인들을 통해 분석하며 도시화로 인한 기온편차 분포를 지면미기후에 의한 국지적 기온편차(LD) 해석을 통해 제시하고 있다.

보행자 환경(Stathopoulos, 2006; Mochida and Lun,

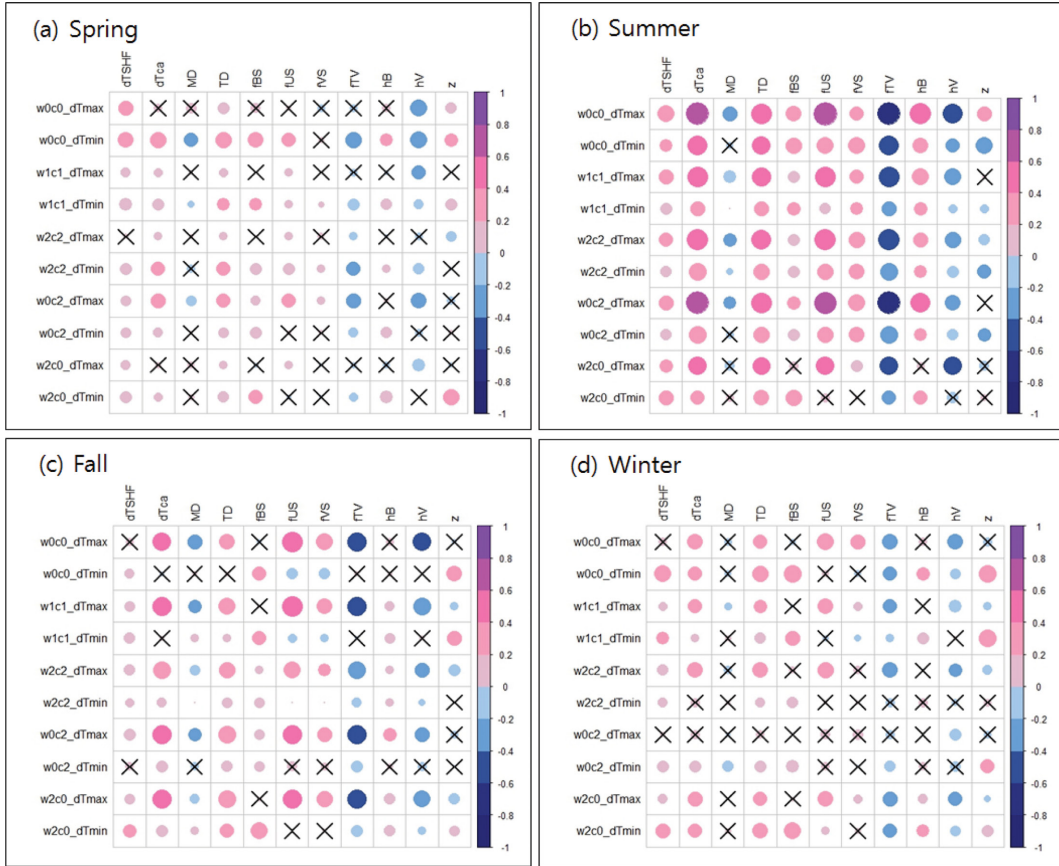


Fig. 6. Correlation coefficient scale matrix between the CAS output variables and the temperature deviations (dT_{max} and dT_{min}) from the Seoul Weather Station reference site at the 18 sites in the DR_EP.

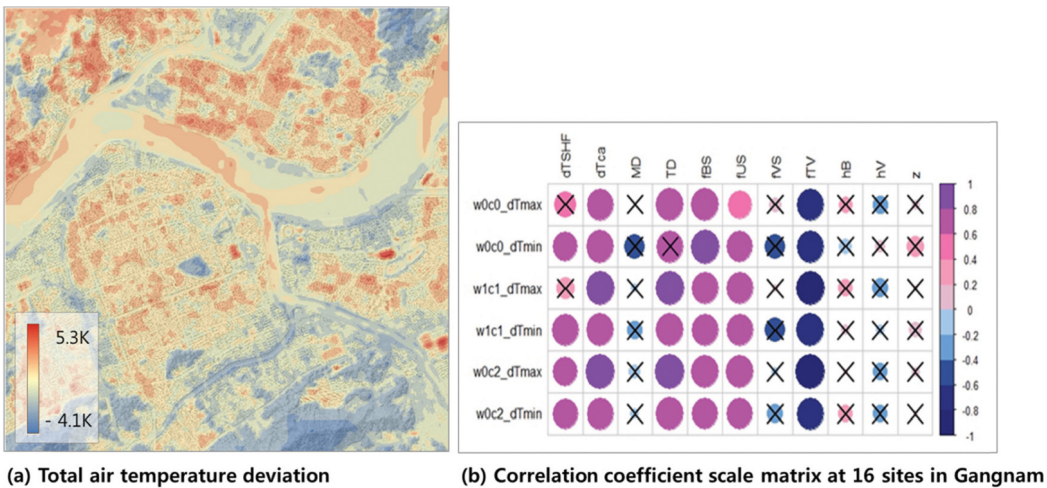


Fig. 7. The study results of Gangnam area as another Detail Region (DR_GN). (a) Total air temperature deviation using the CAS workbench, (b) correlation coefficient scale matrix between the CAS output variables and the temperature deviations (dT_{max} and dT_{min}) from the SWS reference site at the 16 sites in the Gangnam, data period: 1 June~31 August 2013.

2008)에 따라 나타나는 기온편차는 관측자료와 CAS 주요인자별 기온편차들의 비교 결과, 수치기상 모델링을 수행하지 않더라도 LD를 통해서 기온편차를 보다 공간적으로 상세하게 설명할 수 있는 것으로 나타나고 있다. 관측결과와의 비교에서도, 국지적 지표특성을 설명하는 기온편차 LD와 관측자료 기온편차 Obs의 차이는 대략 평균 1K 내외로 비교적 잘 추정하고 있는 것으로 나타났다. LD와 Obs의 기온편차 차이가 MD 등에 비하여 크지 않다면 LD 만을 이용하여 도시화로 인한 기온편차 및 도시열섬을 설명할 수 있을 것이다. 향후 LD의 정확도를 충분히 향상시킨다면 큰 전산자원을 필요로 하는 수치모델링을 이용하지 않고서도, 보행자 환경에서의 열환경 및 지표면 관리 계획에 활용될 수 있을 것이다.

그러나 DR_EP에서 15번 관측지점(이말산 정상 식생지역)의 경우, LD와 Obs의 차이가 최대 2.5 K까지 발생하는 것으로 보아 모든 지역에서의 도시열섬을 LD를 통해 설명할 수 있을 정도로 충분히 정확하지 않은 것으로 나타났다. 이말산 정상 관측지점의 경우 MD와 Obs의 차이는 가장 작게 나타났고, 이 결과는 현재 LD가 분석적 기법으로 반영하고 있지 않는 고도에 따른 기온저감 지연효과를 MD가 중규모 수치기상모델을 통해 반영하였기 때문으로 판단된다. 수도권과 같이 수직적인 높이 분포가 큰 공간규모 또는 표고 변화가 큰 산지형 도시의 경우, MD 또는 지면미기후 특성과 중규모 기후 특성을 절충하고 있는 TD를 이용하거나 LD 분석에서 고도에 따른 기온편차 변화 반응을 검토해야 할 것이다.

단순하게 자연회복 또는 투수분포로부터 기온편차를 설명하는 연구들(Yu and Hien, 2006; Chow et al., 2011)에 비해서 CAS workbench는 개별 건물과 식생이 지면미기후에 미치는 영향들을 고려하여 거리규모의 기온편차를 보다 정교하게 설명하고 있으나, 현재 거리규모 보행자높이에서 발생하는 국지적 열적 부하 변동요인을 충분히 고려하지 않고 있다. 향후 보행자 체감 수준에서 지면 미기후의 시간-공간적 변화 특성을 보다 상세하게 반영하는 CAS LD 개선 연구가 필요하다.

LD 개선을 위해 여러 요인들이 고려되어야 하지만 건물 및 식생 캐노피에 의해 발생하는 그림자의 불균질한 일사분포, 식생의 계절적 변화에 의한 기온저감 효과 차이 등을 우선적으로 고려할 필요성이 있다. SOLWEIG 모델² 등을 이용한 건물 및 수목 등에 의한 지표면 일사 차단(Kwon et al., 2015; An et al., 2016; Lindberg et al., 2016)은 LD 개선에 도움이 될

것이다. 또한 건물 및 수목 분포 특성에 따른 상세한 거칠기길이 변화(Yi et al., 2015), 건물단위의 에너지 사용량(Kim et al., 2015) 및 교통량에 의한 연료배출량 자료를 이용한 인위적 배출원에 의한 열방출량 추정 등도 LD 개선에 기여할 수 있을 것이다.

한편, 지역규모(SR) 상관분석 결과가 상세규모(DR_EP) 상관분석 결과와 경향이 다소 다르게 나타났는데, DR_EP의 경우 최고기온편차(dT_{max})과 최저기온편차(dT_{min}) 계산을 위한 날씨유형 분류 기준을 108번 서울관측소 자료를 기준으로 이용했기 때문이라고 판단된다. 서울관측소는 DR_EP의 외부에 있으며(은평지역을 대표할 수 없으며), 도시의 유형 및 관측조건이 동일하지 않기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 도시의 유형에 따른 영향을 고찰하기 위해, 추가적으로 다른 상세규모(DR_GN)인 강남구 선정릉지역 관측망자료를 이용하여 여름기간(2013년 6월 1일~8월 31일) 기온자료를 같은 방법으로 분석하였다(Fig. 7).

그 결과, DR_EP와 마찬가지로 MD와는 유의성이 없으며, dT_{Ca} , TD , f_{BS} , f_{US} 는 강한 양의 상관관계, f_{TV} 는 강한 음의 상관관계를 나타냈다. 그러나 시간 별로 보면 DR_EP와는 다르게 최고 기온편차와 최저 기온편차와의 차이(주간과 야간의 차이)를 보이지 않는데, 이것은 강남지역이 주간에 불투수 지면(f_{BS} , f_{US})에 가열되어 저장된 열이 야간에 방출하는 현열에너지가 크거나 또는 복사냉각 효과가 약하다는 것으로 판단된다. 날씨의 유형과 관계없이 f_{TV} 의 영향이 큰 것은 폭염에 큰 영향을 주는 여름철에 주간 최고기온편차(dT_{max}) 분포뿐만 아니라 야간 최저기온편차(dT_{min}) 분포에도 식생의 역할이 큰 것을 알 수 있다.

상세규모인 은평(DR_EP)과 강남(DR_GN)은 도시의 건물형태와 구조가 다르며, 국지기후대 유형이 다르다. 이러한 서로 다른 도시특성에서의 거리규모의 면밀한 분석을 위해서 향후 서울의 지표면 특성을 기반으로 국지기후대 분류체계를 개발하고 적용하여 개개의 국지기후대 별로 분석기법을 적용하여 각 기후대의 특성에 따른 기온분포 특성을 비교해 볼 계획이다.

CAS 주요인자들과 기온관측의 상관성을 높이기 위해서는 CAS workbench의 지속적인 매개변수 개선에 따른 최적화가 필요하며, 더불어 도시의 국지적 지면미기후 특성을 체계적이고 지속적으로 모니터링하기 위한 관측망 관리가 매우 중요하다. 도시규모에서의 지표특성을 반영하는 관측자료를 이용하여 분석모델의 지속적인 개선 및 정확한 평가가 가능할 것이다. CAS workbench는 향후 다양한 관측자료를 이용하여 현재의 기온편차들(MD, LD, TD, dT_{SHF} , dT_{Ca})을 포함해 도시의 지면특성을 보다 잘 설명하면서 기온관측과의 상관성을 높일 수 지표들을 발굴할 계획이다.

2. SOLWEIG model : SOLar and LongWave Environmental Irradiance Geometry model

감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다 (KMIPA-2012-0001-1).

REFERENCES

- An, S. M., K. S. Lee, and C. Yi, 2015: Building wind corridor network using roughness length. *J. Korean Inst. Landsc. Archit.*, **43**, 101-113.
- _____, H. G. Son, K.-S. Lee, and C. Yi, 2016: A Study of the urban tree canopy mean radiant temperature mitigation estimation. *J. Korean Inst. Landsc. Archit.*, **44**, 93-106.
- Aoyagi, T., and N. Seino, 2011: A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, Japan. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1476-1496.
- Bhang, K. J., and S.-S. Park, 2009: Evaluation of the surface temperature variation with surface settings on the urban heat island in Seoul, South Korea using Landsat-7 ETM+ and SPOT. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, **6**, 708-712.
- Chow, W. T., R. L. Pope, C. A. Martin, and A. J. Brazel, 2011: Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts. *Theor. Appl. Climatol.*, **103**, 197-211.
- Christen, A., and R. Vogt, 2004: Energy and radiation balance of a Central European City. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1395-1421.
- Eum, J. H., 2008: *Integration of Climate Information into Spatial Planning in Seoul, South Korea*. Ph.D. Thesis, Technical University of Berlin, 164 pp.
- _____, D. Scherer, U. Fehrenbach, and J. H. Woo, 2011: Development of an urban landcover classification scheme suitable for representing climatic conditions in a densely built-up Asian megacity. *Landscape. Urban Plan.*, **103**, 362-371.
- Grimmond, C. S. B., and Coauthors, 2010: Climate and more sustainable cities: climate information for improved planning and management of cities (producers/capabilities perspective). *Environ. Sci.*, **1**, 247-274.
- Hong, J. W., J. K. Hong, S. E. Lee, and J. Lee, 2013: Spatial distribution of Urban Heat Island based on Local Climate Zone of Automatic Weather Station in Seoul metropolitan area. *Atmosphere*, **23**, 413-424 (in Korean with English abstract).
- Ihaka, R., 1998: R: Past and future history. *Comput. Sci. Stat.*, 392-396.
- Jänicke, B., F. Meier, F. Lindberg, S. Schubert, and D. Scherer, 2016: Towards city-wide, building-resolving analysis of mean radiant temperature. *Urban Climate*, **15**, 83-98.
- Jee, J.-B., and Y.-J. Choi, 2014: Conjugation of Landsat data for analysis of the land surface properties in capital Area. *Korean Earth Sci. Soc.*, **35**, 54-68.
- _____, M. Jang, C. Yi, I. S. Zo, B. Y. Kim, M. S. Park, and Y. J. Choi, 2016: Sensitivity analysis of the high-resolution WISE-WRF model with the use of surface roughness length in Seoul metropolitan areas. *Atmosphere*, **26**, 111-126 (in Korean with English abstract).
- Kim, K. R., C. Yi, J.-S. Lee, F. Meier, B. Jaenicke, U. Fehrenbach, and D. Scherer, 2014: BioCAS: Biometeorological climate impact assessment system for building-scale impact assessment of heat-stress related mortality. *Die Erde*, **145**, 62-79.
- Kim, Y. H., and J. J. Baik, 2002: Maximum urban heat island intensity in Seoul. *J. Appl. Meteorol.*, **41**, 651-659.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Bound.-Layer Meteorol.*, **101**, 329-358.
- Kwon, H.-G., H.-J. Yang, C. Yi, Y.-H. Kim, and Y.-J. Choi, 2015: Urban climate impact assessment reflecting urban planning scenarios: connecting green network across the north and south in Seoul. *J. Environ. Impact Assess.*, **24**, 134-153.
- Lee, C., C. Muller, D. Young, E. Warren, C. S. B. Grimmond, X. Cai, and E. Ferranti, 2015: Urban Meteorological Networks: The urban climatologists panacea? *Proc. of the International Conference of Urban Climate*.
- Lindberg, F., S. Onomura, and C. S. B. Grimmond, 2016: Influence of ground surface characteristics on the mean radiant temperature in urban areas. *Int. J. Biometeorol.*, **60**, 1439-1452, doi:10.1007/s00484-016-1135-x.
- Martilli, A., A. Clappier, and M. W. Rotach, 2002: An urban surface exchange parameterisation for meso-scale models. *Bound.-Layer Meteorol.*, **104**, 261-304.
- Masson, V., 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397.
- Mochida, A., and I. Y. Lun, 2008: Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in

- urban area. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **96**, 1498-1527.
- Mosimann, T., T. Frey, and P. Trute, 1999: Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. *Inf. Dienst Nat. Schutz Niedersachs*, **19**, 201-276.
- Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 1-24.
- _____, 1988: Street design and urban canopy layer climate. *Energ. Buildings*, **11**, 103-113.
- _____, 2002: *Boundary layer climates*. Routledge, 435 pp.
- Parlow, E., D. Scherer, and U. Fehrenbach, 2006: Regionale klimaanalyse der region Südlicher Oberrhein (REKLISO). Wissenschaftlicher Abschlussbericht, erstellt im Auftrag des Regionalverbandes Südlicher Oberrhein, Freiburg.
- _____, _____, and _____, 2010: *Klimaanalyse der Stadt Zürich (KLAZ)*. Umwelt und Gesundheitsschutz der Stadt Zürich. Abschlussbericht. 76S.
- Perego, S., 1999: Metphomod – a numerical mesoscale-model for the simulation of regional photosmog in complex terrain: model description and application during Pollumet 1993 (Switzerland). *Meteorol. Atmos. Phys.*, **70**, 43-69.
- Ryu, Y. H., and J. J. Baik, 2012: Daytime local circulations and their interactions in the Seoul metropolitan area. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **52**, 784-801.
- Salamanca, F., and A. Martilli, 2010: A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations—part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theor. Appl. Climatol.*, **99**, 345-356.
- Scherer, D., U. Fehrenbach, H.-D. Beha, and E. Parlow, 1999: Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmos. Environ.*, **33**, 4185-4193.
- _____, _____, T. Lakes, S. Lauf, F. Meier, and C. Schuster, 2013: Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. *Die Erde*, **144**, 238-259.
- Seoul Metropolitan Government (SMG), 2014: *2030 Seoul plan*. Seoul Metropolitan Government, 225 pp.
- Seto, K. C., B. Guneralp, and L. R. Hutyrá, 2012: Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proc. of the National Academy of Sciences*, **109**, 16083-16088.
- Stathopoulos, T., 2006: Pedestrian level winds and outdoor human comfort. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **94** 769-780.
- Stewart, I. D., and T. R. Oke, 2012: Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1879-1900.
- Sukopp, H., R. Wittig, and H. P. Blume, 1993: *Stadtökologie*. Fischer, 402 pp.
- Voogt, J. A., and T. R. Oke, 2003: Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.*, **86**, 370-384.
- Yi, C., J.-H. Eum, Y.-J. Choi, K. R. Kim, D. Scherer, U. Fehrenbach, and G.-H. Kim, 2011: Development of Climate Analysis Seoul (CAS) maps based on landuse and meteorological model. *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, **14**, 12-25.
- _____, S. M. An, K. R. Kim, Y.-J. Choi, and D. Scherer, 2012: Improvement of air temperature analysis by precise spatial data on a local-scale: a case study of Eunpyeong New-town in Seoul. *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, **15**, 144-158.
- _____, H.-G. Kwon, and Y.-J. Choi, 2014a: Utilizing climate information for the improvement of urban planning and environmental management. *Proc. of the autumn meeting of J. Korean Meteor. Soc.*, 1-2.
- _____, K. R. Kim, S. M. An, and Y.-J. Choi, 2014b: Impact of the local surface characteristics and the distance from the center of heat island to suburban areas on the night temperature distribution over the Seoul metropolitan area. *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, **17**, 35-49.
- _____, T. H. Kwon, M. S. Park, Y.-J. Choi, and S. M. An, 2015: A study on the roughness length spatial distribution in relation to the Seoul building morphology. *J. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 235-247.
- _____, K. R. Kim, S. M. An, Y.-J. Choi, A. Holtmann, B. Jaenicke, U. Fehrenbach, and D. Scherer, 2016: Estimating spatial patterns of air temperature at building resolving spatial resolution in Seoul, Korea. *Int. J. Climatol.*, **36**, 533-549.
- Yu, C., and W. N. Hien, 2006: Thermal benefits of city parks. *Energy Build.*, **38**, 105-120.