

## Climate Analysis Seoul (CAS)를 이용한 서울 도심 녹지 주변의 열 환경 분석

이지수 · 이영곤\* · 김백조

국립기상과학원 응용기상연구과

(접수일: 2016년 4월 5일, 수정일: 2016년 7월 25일, 게재확정일: 2016년 8월 23일)

### Analysis of the Thermal Environment around an Urban Green Area in Seoul, Korea Using Climate Analysis Seoul (CAS)

Jisu Lee, Young-Gon Lee\*, and Baek-Jo Kim

*Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea*

(Manuscript received 5 April 2016; revised 25 July 2016; accepted 23 August 2016)

**Abstract** Climate Analysis Seoul (CAS) which provides gridded data relevant for thermal assessment was applied to one of the urban green areas, the Seonjeongneung, in Seoul, Korea. The thermal environment in the Seonjeongneung was evaluated from the CAS simulation for the five heat-wave issued cases during the last five years (2011~2015). The CAS has been improved continuously since it was developed. An updated version with a higher resolution of the CAS simulation domain and an addition of the vegetation information was used in this study. The influence of vegetation in the Seonjeongneung is estimated through the amount of the cold air generation ( $Q_{ca}$ ) and air temperature deviation at each grid points, which are calculated by incorporating Geographic Information System (GIS) analysis on the simulation domain and meteorological analysis with the METeorology and atmospheric PHOtochemistry mesoscale MODel (MetPhoMod) in the CAS. The average amount of the cold air generation ( $Q_{ca}$ ) at the Seonjeongneung is about  $25.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  for the whole cases, and this value is similar to the ones in a forest or a well-wooded region. The average value of the total air temperature deviation (TD) is  $-2.54^\circ\text{C}$  at the Seonjeongneung for the five cases. However, this cooling effect of the urban green area disappeared when the region is replaced by high-rise buildings in the CAS simulation. The  $Q_{ca}$  drastically decreases to about  $1.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  and the average TD shows an increase of  $1.14^\circ\text{C}$  for the same events. This result shows that the vegetation in the Seonjeongneung supposes to keep down temperature during the heat-wave issued day and the average cooling effect of the green region is  $3.68^\circ\text{C}$  quantitatively from the TD difference of the two simulations. The cooling effect represented with the TD difference is larger than  $0.3^\circ\text{C}$  within 200 m distance from the boundary of the Seonjeongneung. Further improvements of the thermodynamical and advection processes above the model surface are required to consider more accurate assessment of the cooling effect for the urban green area.

**Key words:** Climate Analysis Seoul (CAS), thermal environment, urban green area, cooling effect

\*Corresponding Author: Young-Gon Lee, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea  
Phone: +82-64-780-6756, Fax: +82-64-738-6515  
E-mail: yglee71@korea.kr

## 1. 서 론

많은 인구가 집중되어 다양한 인간 활동이 이루어지는 도시지역의 기상특성은 인간 삶의 질과 직접적으로 연관이 있다. 특히 급격한 도시화로 인해 도시 내 식생 피복이 건물과 포장도로 등 불투수층으로 변화함으로써 도심지의 태양복사에너지 흡수에 따른 열 저장력과 증발률이 증가한다. 도시 내 구조가 변화함으로써 지면 온도, 국지적 난류 및 바람의 패턴 등 다양한 기상학적 조건들에 변화가 일어나고, 결과적으로 도시 지역이 주변 지역 보다 20~30%의 추가적인 기온상승 효과가 나타난다(Kim et al., 2000; NIMR, 2009). 이러한 기온상승 효과로 인한 도시기후의 대표적인 기후현상이 도시열섬(Urban Heat Island)이다(Balchin and Pye, 1947). 도시열섬 현상은 도시화에 따른 환경변화가 주요 원인으로 도시 구조물들의 복잡화와 고층화에 따라 바람의 흐름을 차단하게 되면서 도시 중심부의 고온화로 이어진다. 최근 서울의 폭염일수에 대한 분포를 분석한 결과 8월 폭염에 따른 영향 정도가 심각한 것으로 나타났으며, AIB 기후변화시나리오를 적용하였을 때 2050년대와 2090년대에 28.1°C 이상인 날이 각각 35일과 65일로 과거보다 크게 증가할 것으로 전망되고 있다(Kim et al., 2012).

도시개발에 따른 녹지 감소는 국지적인 도시 열섬을 형성하고 녹지축의 단절과 파편화가 심화되면서 도심지와 녹지 간의 대류순환 기능을 현저하게 약화시킨다. 이로 인해 도시 외부의 신선한 공기의 유입을 방해하는 등 대류체계에 변화를 가져오으로써 열 대야와 폭염에 매우 취약한 공간적 특성을 가진다(Jeong, 2009). 이에 반해 도심녹지를 증가시키면 식생의 일사 차폐로 인한 녹음 효과 및 높은 알베도 등의 영향으로 주변 도심지보다 상대적으로 기온 저감 현상을 나타낸다(Oke, 1989; Kwon, 2002; Jansson et al., 2007). 이러한 기온저감 효과는 도시 내 냉섬(Cool island)을 형성하여 도시열섬 현상을 완화시키는 역할을 한다. Jansson et al. (2007)은 공원과 도심 지역의 기온을 관측하여 여름철 주간에는 0.5~0.8°C, 야간에는 최대 2.0°C의 기온 차이를 보인다고 제시하였다. 따라서 도시에 녹지를 조성하면 주변보다 상대적으로 기온이 하강하여 부분적으로 하강기류가 발생하고 냉각된 공기가 주변으로 유입되어 도시의 열 환경을 개선하는 효과를 볼 수 있다(Susca et al., 2011).

최근 도시계획과 도시개발 단계에서 더욱 쾌적한 도시환경 조성을 위한 기초자료로서 도시 열 환경, 바람길, 대기질 등과 같은 도시지역 기후정보에 대한 수요가 증가하고 있다(KEI, 2011). 이러한 정보들을 도시지역의 지형 및 토지이용 변화에 따라 바람장과 기온 등 대기상태의 변화와 이로 인해 새롭게 형성된

도시기후의 특성을 장기간의 기상관측 및 수치모델 등 분석자료 등을 통해 지도형식으로 도시기후지도로 제작된다. Pyon et al. (2009)은 비생태지도를 작성하고 이를 바탕으로 도시기후 분석을 실시하여 도시녹지와 도시기후를 고려한 토지이용계획 기법을 제안하였다. 국내에서 도시기후지도와 관련한 연구로는 서울시에서 2007년과 2008년에 기후지도제작과 관련한 연구를 진행하였으며, 2015년에는 서울시 기후환경에너지 지도 제작 연구를 진행하여 도시 환기, 대기오염 대책, 열섬 대책, 이산화탄소 배출량 삭감 대책 수립 등에 활용하고 있다. Lee et al. (2010)은 창원시를 대상으로 친환경적 공간계획을 위한 도시의 열 환경을 분석하였으며, Shin et al. (2011)은 서울 및 수도권 지역을 대상으로 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델과 Automated Weather System (AWS) 자료를 이용하여 도시기후지도와 도시계획 및 관리를 위한 지침도를 작성하였다. Park et al. (2011)은 내륙대도시인 대구지역을 대상으로 도시기후 및 환경 특성에 맞는 도시환경 기후지도를 시범적으로 제작하여 도시환경기후지도 작성에 대한 방법론을 제시하였다. 이러한 기존 연구들은 친환경적인 도시계획을 위하여 도시기후영향 정보의 중요성을 강조하였다. 그러나 선행연구에서 도출된 도시기후지도들은 인공구조물의 복사전달, 도심 녹지에 의한 찬 공기 형성 등 도시지역의 상세 구조에 의한 도시기후 영향을 반영하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 국립기상과학원과 독일 베를린공대가 공동으로 개발한 도시기후 시뮬레이터(Climatic Analysis Seoul, CAS)를 이용하여 서울 도심녹지 중 하나인 선정릉이 주변지역 기온에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 선정릉이 상업지로 대체되었을 때를 가상으로 모의하여 선정릉 내 녹지로 인한 기온냉각 효과를 정량적으로 산출하였다.

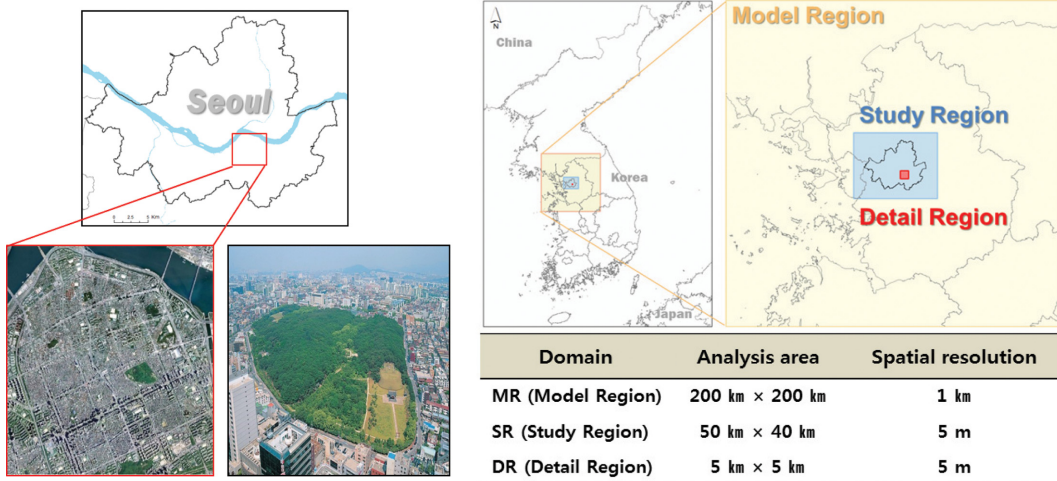
## 2. 연구방법

### 2.1 사례일 및 대상지역

도심녹지가 주변 지역의 기온 상승을 얼마나 완화할 수 있는지를 분석하기 위하여 최근 5년간(2011~2015년) 서울에서 가장 무더웠던 날들을 사례로 선정하였다(Table 1). 각 사례일들은 여름철 북태평양 고기압의 영향권에 본격적으로 들면서 덥고 습한 공기로 인하여 서울 지역에 폭염경보(2015년) 및 폭염주의보(2011~2014년)가 발령된 경우들이다. 또한, 빌딩이 밀집해 있고 변화한 지역을 대상으로 폭염 발생 시 도심녹지가 주변 지역 열 환경에 미치는 영향을 분석하기 위하여 서울시 강남구 선정릉 일대를 대상으로 연구를 수행하였다(Fig. 1). 선정릉은 전체 면적 약 20,000

**Table 1.** Five heat-wave issued cases considered in this study during the last five years (2011~2015).

| Case 1         | Case 2       | Case 3       | Case 5       | Case 6       |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 2011.7.19.~20. | 2012.8.8.~9. | 2013.8.7.~8. | 2014.8.1.~2. | 2015.8.6.~7. |



**Fig. 1.** (Left) The location of the study area around the Seonjeongneung in Seoul, Korea, and (right) the areas and the resolutions of three domains used in the CAS simulation.

m<sup>2</sup> 부지 내에 평균 약 15~20 m 높이의 수목과 초지로 이루어진 서울의 도심 속 대표적 녹지 중 한 곳이다.

CAS는 선정릉과 같이 복잡한 도시 구조를 반영하여 기후영향을 진단 및 평가 할 수 있는 시스템으로써 지표 근처에서 나타나는 물리과정으로 인해 도시 캐노피 안에서 이루어지는 기상현상을 모의하고 그 결과를 수치지도(Digital Map)로 표출한다(Yi et al., 2011). 따라서 다양하고 복잡한 도시공간구조를 고려한 종합적이면서도 공간화된 상세한 도시기후영향 및 진단을 할 수 있는 정보를 제공할 수 있다(Yi et al., 2012a, b; Kwon et al., 2015).

선정릉 주변 열 환경을 모의하는데 있어 CAS는 Fig. 1과 같이 세 가지 모델 영역을 이용한다. 가장 외곽에 위치한 모델 지역(Model Region, MR)은 Yi et al. (2011)과 동일하게 수도권을 포함한 200 × 200 km 영역을 대상으로 공간 해상도 1 × 1 km로 설정하였다. 그러나 CAS 모의 결과의 정확도 향상을 위하여 본 연구에서는 서울 주변지역을 포함하여 50 × 40 km 영역에 대한 연구지역(Study Region, SR) 도메인의 해상도를 기존 25 × 25 m에서 5 × 5 m로 개선하여 새로운 SR을 구축하였다. 마지막으로 상세지역(Detail Region, DR) 역시 선정릉을 포함하여 주변 5 × 5 km 영역을 대상으로 SR과 동일한 공간 해상도인 5 × 5 m로 설정하였다.

## 2.2 입력자료

CAS에 입력되는 공간정보 자료는 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)과 토지피복(Land Cover, LC)이다. 국립기상과학원에서는 2014년 환경부 토지피복도와 항공우주연구원의 KOMSAT-2 MSS 위성영상, 국토지리정보원의 항공라이다 자료를 이용하여 DEM과 토지피복 자료를 구축하였다(NIMR, 2014). CAS에서 DEM은 자연적인 지형에 대한 정보를 나타내는 수치지형모델(Digital Terrain Model, DTM)과 건물, 수목, 인공구조물을 나타내는 수치표면모델(Digital Surface Model, DSM)으로 세분화된다. 기존 CAS에서 DSM을 생성할 때 DTM과 건물 고도 정보만을 결합한 자료를 이용하였으나, 본 연구에서는 식생 고도의 정보까지 고려할 수 있도록 입력 자료를 개선하여 선정릉 주변에 대해 3가지 입력자료를 구축하였다(Fig. 2). 열 환경을 분석하기 위한 주요 입력자료 중 하나인 토지피복 자료는 KOMSAT-2 MSS 위성영상에 감독분류(Supervised Classification, SC) 기법을 적용하고 국토교통부의 도로명 주소 중 건물자료를 이용하여 Table 2와 같이 여섯 가지 유형으로 분류하였다.

이상의 공간 입력정보를 기반으로 CAS 내에 연동된 중규모 기상모형인 MetPhoMod (METeorology and atmospheric PHOtochemistry mesoscale MODEL)에 입



Fig. 2. Three spatial information data (DTM, DSM, and LC) of the CAS simulation around the Seonjeongneung region.

Table 2. Description of the six LC types used in the CAS simulation.

| LC Types             | Code | Remarks  |
|----------------------|------|--|
| Water Surfaces       | WS   | Inland waters and sea surfaces                               |
| Tall Vegetation      | TV   | Tall vegetation (mainly trees) forming well-defined canopies |
| Vegetated Surfaces   | VS   | Vegetated surfaces (except TV)                               |
| Unvegetated Surfaces | US   | Asphalt/concrete surfaces without buildings, bare soils      |
| Built-up Surfaces    | BS   | Surfaces containing buildings of any type                    |
| Ice/Snow             | IS   | Glaciers, seasonal snow cover                                |

Table 3. Input parameter values of the MetPhoMod model classified into the six LC types.

| Index | LC types         | Code | Albedo | Emissivity | Volumetric heat capacity | Thermal diffusivity            | Surface temperature | Ground temperature | Roughness length |
|-------|------------------|------|--------|------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
|       |                  |      | -      | -          | J km <sup>-3</sup>       | m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> | K                   | K                  | m                |
| 1     | Water surface    | WS   | 0.07   | 0.98       | 84.00                    | 1.43                           | 20                  | 20                 | 0.001            |
| 2     | Tall vegetation  | TV   | 0.13   | 0.95       | 7.20                     | 2.78                           | 18                  | 22                 | 2.000            |
| 3     | Unsealed surface | US   | 0.15   | 0.95       | 2.16                     | 2.31                           | 18                  | 22                 | 0.050            |
| 4     | Sealed surface   | SS   | 0.18   | 0.92       | 1.98                     | 6.57                           | 18                  | 22                 | 0.050            |
| 5     | Built-up surface | BS   | 0.16   | 0.92       | 21.05                    | 1.91                           | 18                  | 22                 | 3.728            |
| 6     | Ice or snow      | IS   | 0.65   | 0.98       | 3.86                     | 1.82                           | 0                   | -2                 | 0.005            |

력할 알베도(albedo), 복사능(emissivity), 체적열용량(volumetric heat capacity), 열확산율(thermal diffusivity), 지표면온도(surface temperature), 지온(ground temperature), 거칠기 길이(roughness length) 등 7가지 parameter들을 산출하였다. 모델 격자 내의 각 parameter들은 Table 3의 여섯 가지 주요 토지피복 종류들이 차지하는 비율을 퍼센트로 환산하여 fractional coverage (FC)로 계산하고, 각 격자 영역의 parameter들을 식 (1)과 같이 면적비율의 가중치 평균에 의해 구하였다.

$$A = \frac{1}{\sum_{i=1}^6 f_{CL}} \cdot \sum_{i=1}^5 (f_{LC} \cdot A_{LC}) \quad (1)$$

여기서  $f_{LC}$ 는 각 격자 내에 여섯 가지 토지피복 형태들이 차지하는 비율로서 범위는 0~1이다.  $A_{LC}$ 는 Table 2와 같이 각 토지피복 형태에 대한 속성값들로 Yi et al. (2011)이 독일의 선행연구를 기반으로 재구성한 것이다. 따라서 위 식을 이용하여 도시 공간정보로부터 계산된 열 확산, 열 용량 등 parameter들을 MetPhoMod에 입력하여 대상지역 주변의 기온과 바람장을 모의하고, 최종적으로 모의 결과를 수치지도로 표출 및 생산하였다(Perego, 1999).

Table 4는 선정릉 주변 기상 초기장 및 경계장 생성을 위한 MetPhoMod 모델의 입력값을 나타낸다. 모델 실행을 위해 필요한 초기값은 바람의 U와 V 성분, 가온위, 혼합비 등이 있다. 본 연구는 서울시 종로구

**Table 4.** Simulation periods and initial meteorological parameters of the MetPhoMod model for the five heat-wave issued cases.

| Input parameters                    | Simulation period                         |   |   |   |   |
|-------------------------------------|---|---|---|---|---|
|                                     | 2011.7.19. 06:00<br>~<br>2011.7.20. 18:00 | 2012.8.8. 06:00<br>~<br>2012.8.9. 18:00 | 2013.8.7. 06:00<br>~<br>2013.8.8. 18:00 | 2014.8.1. 06:00<br>~<br>2014.8.2. 18:00 | 2015.8.6. 06:00<br>~<br>2015.8.7. 18:00 |
| U (m s <sup>-1</sup> )              | 3.78                                      | -1.53                                   | -1.56                                   | 2.95                                    | 0.89                                    |
| V (m s <sup>-1</sup> )              | 2.05                                      | 0.36                                    | -1.92                                   | 1.03                                    | -0.72                                   |
| Virtual potential temperature (K)   | 305.98                                    | 306.38                                  | 305.32                                  | 308.12                                  | 302.97                                  |
| Mixing ratio (kg kg <sup>-1</sup> ) | 0.01303                                   | 0.01542                                 | 0.01337                                 | 0.01666                                 | 0.01718                                 |

송월동에 위치한 서울기상대(ASOS No.108)의 관측 자료를 기준으로 Table 4의 사례기간 중 평균값을 모델 초기값으로 입력하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 선정릉의 열 환경 특성

Figure 4a는 전체 분석사례들에 대해 CAS에서 모의된 선정릉 주변의 찬 공기 생성과 종합 기온편차이다. 찬 공기 생성량은 CAS에서 지면의 피복과 기복에 대한 분석자료와 중규모 기상모델인 MetPhoMod의 모의수행 분석결과를 이용하여 계산한다. 찬 공기 생성량은 토지피복 분류 중 녹지를 나타내는 TV (Tall Vegetation)와 VS (Vegetated Surfaces)가 차지하는 비율에 따라 시간 및 면적당 차고 신선한 공기를 생성하는 양으로서 외부 유입에 의한 것이 아닌 녹지에 해당하는 토지피복에 의한 국지냉각(local cooling)을 의미한다. 그림에서 선정릉 내 녹지로 인해 생성되는 차고 신선한 공기가 평균 약 25.5 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>로 Mosimann et al. (1999)이 숲이나 수목이 많은 지역에 대해 제시한 30.0 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>와 유사한 값을 나타내었다.

찬 공기 생성량과 더불어 MetPhoMod 모델은 두 개의 공간 규모에 대해 독립적으로 각각 중규모 기온편차(Meso-scale air temperature Deviation, MD)와 국지 규모 기온편차(Local-scale air temperature Deviation, LD)를 구한 후 이를 합하여 종합 기온편차(Total air temperature Deviation, TD)를 계산한다(Yi et al., 2011). 중규모 기온편차는 모델 영역 내 공기의 이동과 정체를 모두 계산한 후 야간(전날 20시부터 다음 날 6시)에 고도 10 m에서 산출된 전체 평균기온에서 각 격자별 평균기온을 뺀 차로 구해진다(Kim et al., 2014). Yi et al. (2016)은 현열 플럭스에 의한 지표와 대기 간 열 교환과 난류 혼합에 의한 열 확산, 지표층의 찬 공기 생성에 의한 냉각의 과정들을 아래의 식으로부터 국지규모 기온편차를 계산하였다:

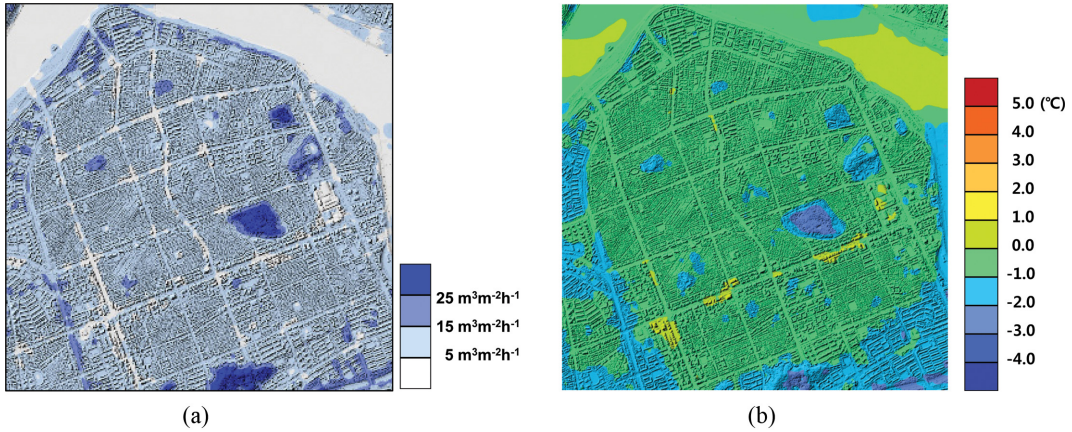
$$dT_{SHF} = (f_{CSAR} - 1) \times c_{SHF}, \tag{2}$$

$$f_{CSAR} = 1 + 4 \times \sqrt{f_{BS}} \times \frac{h_B}{d_s}, \tag{3}$$

$$dT_{ca} = c_{ca} \times Q_{ca}. \tag{4}$$

위에서  $dT_{SHF}$ 는 야간에 건물 표면에서 대기로의 현열 방출로 인한 국지규모 기온 증가를 나타내는 것으로 건물이 없는 지역에서는 1의 값을 가지고 건물이 있는 지역에서는 1보다 큰 값을 가진다. 식 (2)에서  $dT_{SHF}$ 는 건물 전체 면적에 대한 종합비(complete surface aspect ratio),  $f_{CSAR}$ 과 현열 플럭스에 대한 empirical coefficient,  $c_{SHF}$ 의 곱으로 계산된다(Christen and Vogt, 2004). 식 (3)로부터  $f_{CSAR}$ 은 모델 격자 당 평균 높이  $h_B$ 인 단일 건물이 갖는 표면적(지붕 1면과 4면의 built-up surface,  $f_{BS}$ )의 fractional coverage로 정의된다. 건물의 현열 플럭스에 의한 기온 상승과 대조적으로 local cooling,  $dT_{ca}$ 는 식 (4)와 같이 찬공기 생성량,  $Q_{ca}$ 에 empirical cooling factor,  $c_{ca}$ 를 곱하여 구한다. 본 연구에서  $c_{SHF}$ 와  $c_{ca}$ 는 다른 선행연구와 동일하게 각각 2.0 Kh m<sup>-1</sup>과 -0.05 Kh m<sup>-1</sup>로 설정하였다(Kim et al., 2014; Yi et al., 2016).

공기의 이동과 정체와 관련한 중규모 기온편차와 각 격자별 피복과 건물의 열적 특성 등 국지규모 기온편차를 모두 고려한 종합 기온편차를 Fig. 3b와 같이 정량적으로 산출하였다. 찬 공기 생성량과 동일하게 종합 기온편차는 선정릉을 중심으로 전체 폭염사례에 대해 약 -2.54°C의 값을 나타내었다. 각 사례일에 대해 산정된 중규모 및 국지, 종합 기온편차를 Table 5에 제시하였다. Table에서 중규모 기온편차는 종관풍에 의한 찬 공기가 주변지역으로의 수송을 고려하기 때문에 Table 4의 기상 입력자료에 따라 변화한다(Yi et al., 2011). 이에 반해 국지규모 기온편차는 토지피복률, 건물 밀도, 건축물의 높이 및 부피에 따라 분석된 상대적인 온도차이로서 모델 격자 별 지리환경정보에 따라 열 환경 정보를 나



**Fig. 3.** Average distribution of (a) the cold air production ( $Q_{ca}$ ) and (b) the total temperature deviation (TD) for the five heat-wave issued cases around the Seonjeongneung region.

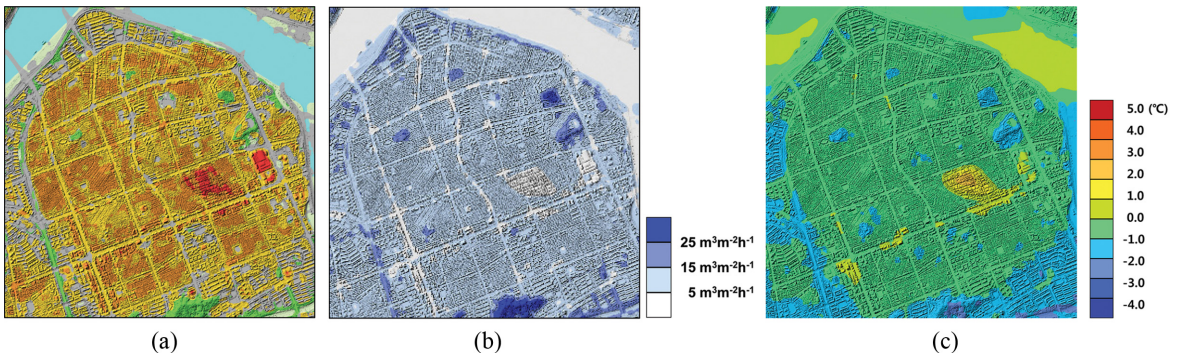
**Table 5.** Meso-scale (MD), Local-scale (LD), and Total air temperature deviations (TD) at the Seonjeongneung for the five heat-wave issued cases.

| Event period    | MD (°C) | LD (°C) | TD (°C) |
|-----------------|---------|---------|---------|
| 2011.07.19.~20. | -1.60   | -1.20   | -2.80   |
| 2012.08.08.~09. | -1.30   | -1.20   | -2.50   |
| 2013.08.07.~08. | -1.50   | -1.20   | -2.70   |
| 2014.08.01.~02. | -1.70   | -1.20   | -2.90   |
| 2015.08.06.~07. | -0.80   | -1.20   | -2.00   |
| Average         | -1.38   | -1.20   | -2.58   |

타내므로 선정릉에 대해서는  $-1.2^{\circ}\text{C}$ 의 동일한 기온 편차를 나타내었다. 중규모와 국지규모 기온편차를 합한 종합 기온편차는  $-2.0\sim-2.9^{\circ}\text{C}$ 로 선정릉의 녹지로 인해 주변 상업지보다 상대적 낮은 열 환경을 보여준다.

### 3.2 선정릉의 기온 저감 효과

CAS는 도시의 공간정보를 기반으로 상대적인 기온 등 열 환경 특성을 분석할 뿐만 아니라 모델 영역 내 공간 구조를 가상으로 변경함으로써 도시기후 변화 특성을 정량적으로 모의할 수 있다. 본 연구에서는 선정릉을 고층건물로 대체하여 수목 등 녹지로 인해 주변보다 기온이 낮은 특성이 어떻게 변화하는지를 모의 실험하였다. Figure 4a와 같이 선정릉 영역을 삼성동 코엑스와 동일한 고층 빌딩으로 대체하고 다섯 번의 폭염 사례에 대해 Table 4와 같이 동일한 기상조건으로 CAS를 구동하였다. 그 결과 Fig. 4b와 같이 빌딩들로 인해 차고 신선한 공기 생성이 평균 약  $1.1\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$  정도로 코엑스나 테헤란로 주변과 같이 매우 적은 양을 나타내었다. Table 6에서 각 사례에 대해 동일한 기상조건을 입력하였음에도 불구하고 빌딩의 영향으로 인한 공기의 흐름 및 열 확산 과정 등이 변함에 따라 녹지일 때 보다 중규모 기온편차가



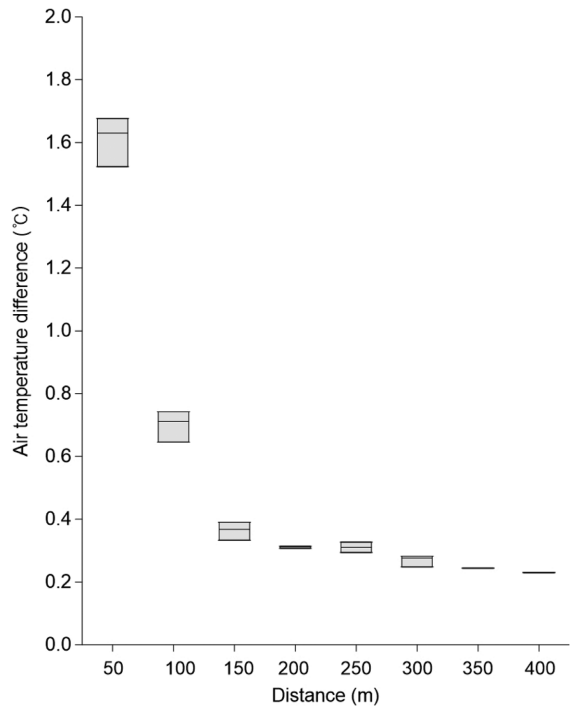
**Fig. 4.** (a) LC, (b)  $Q_{ca}$ , and (c) TD of the Seonjeongneung when it is substituted for high-rise buildings.

**Table 6.** The same as Table 5 except for replacing the Seonjeongneung by the built-up region.

| Event period    | MD (°C) | LD (°C) | TD (°C) |
|-----------------|---------|---------|---------|
| 2011.07.19.~20. | -0.90   | 1.90    | 1.00    |
| 2012.08.08.~09. | -0.70   | 1.90    | 1.20    |
| 2013.08.07.~08. | -0.80   | 1.90    | 1.10    |
| 2014.08.01.~02. | -1.00   | 1.90    | 0.90    |
| 2015.08.06.~07. | -0.40   | 1.90    | 1.50    |
| Average         | -0.76   | 1.90    | 1.14    |

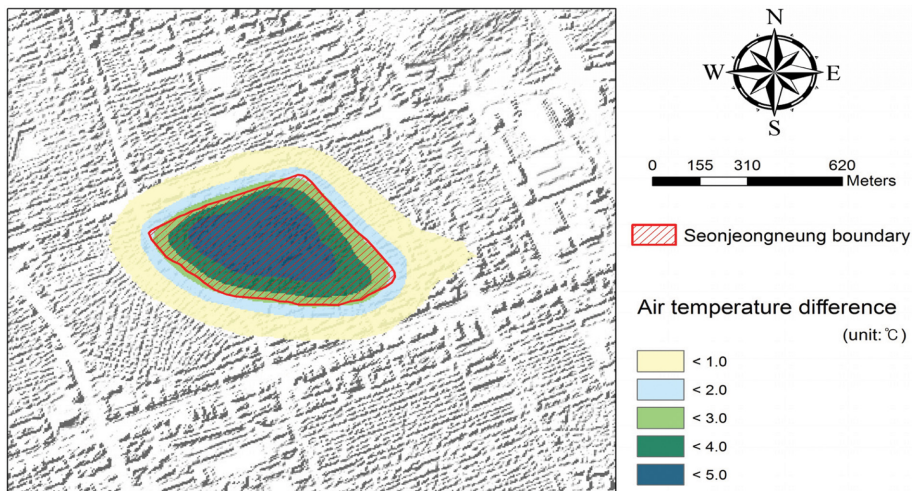
약 50% 높게 나타났다. 국지규모 기온편차 역시 빌딩들의 면적에 따른 현열 플럭스 영향을 반영하여 녹지일 때 보다 3.1°C 높은 편차를 보였다. 이러한 영향을 모두 고려한 종합 기온편차 역시 0.9~1.5°C이고 평균 역시 1.14°C 증가를 보였다(Fig. 4c). 또한 이러한 기온상승 구역이 선정릉뿐만 아니라 남동쪽의 테헤란로와 삼성동 코엑스 부근까지 확장되는 것을 Figs. 3b와 4c의 비교에서 확인할 수 있다. 따라서 선정릉이 녹지 대신 고층 건물로 대체될 경우 여름철 폭염 시 주변의 기온이 평균 3.68°C 이상 상승하는 등 열 환경이 악화됨을 CAS 모의를 통해 알 수 있다.

Figure 5는 전체 사례일에 대해 선정릉과 이 지역이 빌딩으로 대체되었을 경우에 대한 종합 기온편차 차이를 1°C 간격 등치선으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 선정릉 내 격자점에서 산출된 편차값이 주변지역에 비해 4.0~5.0°C 정도 낮고, 붉은색의 경계 지역도 약 3.0°C의 낮은 값을 나타내었다. 또한 선정릉 녹



**Fig. 6.** The calculated minimum, median, and maximum TD differences shown in Fig. 5 along with the distance from the boundary of the Seonjeongneung.

지의 영향으로 상대적으로 1.0~2.0°C 낮은 기온 분포가 선정릉 외곽에 까지 분포하였다. 따라서 선정릉 경



**Fig. 5.** The averaged TD difference distribution between the real land coverage (Fig. 3b) and its imaginary substitution of buildings (Fig. 4c) at the Seonjeongneung for the five heat-wave issued cases. The green type colors show the temperatures deviation and the red line presents the boundary of the urban green area.

계로부터 거리에 따른 종합 기온편차를 Fig. 6과 같이 구한 결과 약 200 m까지 뚜렷한 차이를 확인할 수 있다. 거리별 종합 기온편차는 50 m까지 약 1.6°C를 나타내지만 선정릉에서 멀어짐에 따라 급속히 감소하여 200 m보다 먼 거리에서는 0.3°C 이하의 매우 적은 값을 보였다. 따라서 선정릉 내 녹지가 주변 기온하강에 영향을 미치는 거리가 약 200 m 정도로써 Lee et al. (2013)이 선정릉에서 관측한 평균 거리 200~250 m와 잘 일치하였다. 또한 Myeong (2010)이 선정릉보다 10배 가량 규모가 큰 서울의 5개 도심 녹지에 대한 거리별 기온감소 효과 역시 평균 300 m로 제시한 결과와도 일관성을 보였다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 5년 간 발생한 다섯 폭염 사례 일들에 대해 서울시 강남 선정릉 지역을 대상으로 열 환경을 모의하였다. 특히, 도심녹지인 선정릉이 주변 지역에 대해 상대적인 기온 특성을 종합적으로 분석하고, 이 지역이 고층건물로 대체될 경우에 각각의 기온편차를 정량적으로 분석함으로써 도심녹지가 도시 기후에 미치는 영향을 알아 보았다.

폭염이 발생한 다섯 사례에 대해 선정릉에서 산출한 찬 공기 생성량은 평균 약  $25.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  정도로 숲이나 수목이 많은 지역과 비슷한 양이 생성되는 것으로 확인하였다. 또한 공기의 이류, 정체 등 고려한 중규모 기온편차와 도시 구조물과 피복에 따른 야간의 현열 발생 등 국지규모 기온편차를 합한 종합 기온편차 역시 전체 모델 영역에 비해 평균 2.54°C 낮게 산출되었다. 반면, 선정릉이 고층건물로 대체 되었을 경우는 코엑스나 테헤란로와 유사하게 평균 약  $1.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  정도의 매우 적은 양이 발생함을 알 수 있었다. 또한 폭염이 발생한 사례들에 대해 빌딩으로 대체된 선정릉의 평균 종합 기온편차가 1.14°C 증가하고, 이러한 영향이 선정릉 남동쪽의 테헤란로와 삼성동 코엑스 부근까지 미치는 것으로 나타났다.

두 모의 사례의 비교를 통해 서울지역 폭염 발생 시 선정릉 내부의 종합 기온편차는 4.0~5.0°C 정도 낮고, 선정릉 경계 지역에서 멀어질수록 편차가 점차 줄어들었다. 이러한 선정릉 녹지에 의한 기온감소 효과는 선정릉 경계로부터 약 200 m까지 뚜렷하게 나타났으며, 다른 선행연구의 결과들과도 잘 일치하였다. 그러나 50 m 부근에서 약 1.6°C의 기온차를 보이던 것이 거리에 따라 급속히 감소하여 200 m보다 먼 거리에서는 0.3°C 이하로 거의 차이가 없었다.

본 연구를 통하여 선정릉과 같이 도심녹지로 인해 미규모의 도시 냉섬을 형성하여 도시기후 열 환경을 완화하고 있음을 CAS 모의실험을 통하여 확인할 수

있었다. 그러나 CAS 모델은 다른 기상모델과 같이 지표와 대기 간 열역학 과정을 포함하고 있지 않기 때문에 각 격자 지점의 정확한 기온을 추정하는데 한계가 있다. 그럼에도 CAS의 도시구조에 따른 기상영향 분석 결과들은 도시계획 수립과정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 “차세대 도시·농림 융합스마트 기상서비스 개발” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- Balchin, W. G. V., and N. Pye, 1947: A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **73**, 297-3113.
- Christen, A., and R. Vogt, 2004: Energy and radiation balance of a Central European City. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1395-1421.
- Jansson, C., P. E. Jansson, and D. Gustafsson, 2007: Near surface climate in an urban vegetated park and its surroundings. *Theor. Appl. Climatol.*, **89**, 185-193.
- Jeong, J.-C., 2009: Comparison of land surface temperatures derived from surface emissivity with urban heat island effect. *J. Environ. Impact Assess.*, **18**, 219-227.
- Kim, E., S.-W. Jeon, J.-W. Lee, Y.-H. Park, and D.-K. Lee, 2012: Local adaptation plan to climate change impact in Seoul: Focused on heat wave effects. *J. Environ. Impact Assess.*, **21**, 71-80.
- Kim, K.-H., B.-J. Kim, J.-H. Oh, W.-T. Kwon, and H.-J. Baek, 2000: Detection of urbanization effect in the air temperature change of Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **36**, 519-526.
- Kim, K.-R., C. Yi, J.-S. Lee, F. Meier, B. Jänicke, 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.
- Korea Environment Institute (KEI), 2011: Urban renewal strategy for adapting to climate change: use of green infrastructure on flood mitigation. Research Report 2011-07, 206 pp.
- Kwon, H.-G., 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**, 1134-1153.



- Kwon, Y.-A., 2002: *The influence of urban green areas on ambient air temperature in Seoul*. Ph.D. Thesis, Konkuk University, 206 pp.
- Lee, K.-J., J. I. Kwak, H. S. Kim, and J.-M. Jeong, 2013: Effect on the thermal environment of the surrounding area due to the large-scale green area – in case of Seonjeongeung. *Proc. of the Korean Society of Environment and Ecology Conference*, **23**, 109-110.
- Lee, W.-S., S.-G. Jung, K.-H. Park, and K.-T. Kim, 2010: Analysis of urban thermal environment for environment-friendly spatial plan. *J. Korean Assoc. Geogr. Inform. Stud.*, **13**, 142-154.
- Mosimann, T., T. Frey, and P. Trute, 1999: Schutzut Klima/ Luft in der Landschaft splanung. *Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen*, **19**, 201-276.
- Myeong, S., 2010: A preliminary analysis of the impact of urban green spaces on the urban heat island effect using a temperature map. *Korean J. Remote Sens.*, **26**, 675-680.
- NIMR, 2009: Understanding climate change 2 - Climate change in the Korean peninsula: The present and future. 11-13606395-000160-01, 86 pp.
- \_\_\_\_\_, 2014: Development of prediction model for urban and rural area (III) - Integrated weather services for urban and rural area (III). 11-1360000-0011310-10, 81-95.
- Oke, T. R., 1989: The micrometeorology of the urban forest. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, **324**, 335-349.
- Park, M.-H., W.-S. Jung, and H.-D. Kim, 2011: A study on urban environmental climate mapping method for sustainable urban planning in Daegu. *J. Environ. Sci.*, **20**, 465-482.
- Perego, S., 1999: MetPhoMod, A numerical mesoscale model for simulation of regional photo-smog in complex terrain; model description and application during Pollumet 1393 (Switzerland). *Meteor. Atmos. Phys.*, **70**, 43-69.
- Pyon, H.-S., Y.-B. Song, and B.-H. Han, 2009: Landuse planning method considering urban greenery and urban climate. *J. Korea Plan. Assoc.*, **44**, 37-49.
- Shin, D.-H., S.-P. Cho, M. Moriyama, H. Takebayashi, and K. S. Lee, 2011: A study on the mapping urban climate atlas for the pro-environmental urban planning. *Seoul Studies*, **12**, 1-16 (in Korean).
- Susca, T., S. Gaffin, and G. Dell’Osso, 2011: Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. *Environ. Pollut.*, **159**, 2119-2126.
- Yi, C.-Y., 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. Inform. Stud.*, **14**, 12-25.
- \_\_\_\_\_, K.-R. Kim, Y.-J. Choi, H.-Y. Won, and D. Scherer, 2012a: Nocturnal surface cooling and cold air transport analysis based on high density observation - A case study of Eunpyeong new town in Seoul. *J. Korean Assoc. Geogr. Inform. Stud.*, **15**, 127-137.
- \_\_\_\_\_, S.-M. An, K.-R. Kim, Y.-J. Choi, and D. Scherer, 2012b: 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. Inform. Stud.*, **15**, 144-158.
- \_\_\_\_\_, K.-R. Kim, S.-M. An, Y.-J. Choi, A. Holtmann, B. Jänicke, U. Fehrenbachd, and D. Scherer, 2016: Estimating spatial patterns of air temperature at building-resolving spatial resolution in Seoul, Korea. *J. Climatol.*, **36**, 533-549.