

# 3차원 도시공간정보를 이용한 도시열섬현상의 분석

## Analysis of Urban Heat Island Effect Using Information from 3-Dimensional City Model (3DCM)

전 범 석\*      김 학 열\*\*  
Bun Seok Chun      Hag Yeol Kim

**요약** 본 연구는 2차원적 도시특성변수를 이용한 기존 선행연구와 달리, 도시기하학적인 특성을 중심으로 도시열섬현상에 관한 설명모형을 구축하고 이에 대한 정책적 시사점을 제시하고자하는 연구이다. 오하이오주 콜럼버스 도시(Columbus, Ohio)의 3차원 도시공간구축을 위하여 LiDAR 데이터가 활용되었고, 건축물의 외부공간을 구축하기 위하여 건물수치지도가 이용되었다. 또한 식생지수와 도시온도 자료를 추출하기 위하여 Landsat TM 영상의 band 3, band 4, Thermal band가 이용되었다. 복잡한 자료 추출 과정을 통해 획득된 6가지 변수들(건물의 총 부피, 건물의 총 표면적, 평균 건물의 높이-도로폭 비율, 공극률, 건물바닥면적비율, 식생지수)을 도입하여 단순회귀 및 다중회귀 모형을 구축하였다. 회귀모형구축에 있어서는 비선형관계에 있는 변수를 선형화하기 위해 Box-Tidwell 변형기법을 적용하였으며 최적화된 변수변형을 통한 선형회귀모형을 구축하였다. 공극률, 식생지수, 건축 표면적 변수로 추정된 다중회귀모형은 전체 온도변이의 57%를 설명할 수 있는 것으로 나타났으며, 도시열섬을 저감시키기 위한 다양한 정책수립(오픈스페이스 확대정책, 옥상녹화, 벽면녹화 등)에 의미있는 결과를 제공하였다.

**키워드** : 도시열섬현상, 3차원 도시모델, 도시 기하학, Box-Tidwell 변환

**Abstract** Unlike the previous studies which have focused on 2-dimensional urban characteristics, this paper presents statistical models explaining urban heat island(UHI) effect by 3-dimensional urban morphologic information and addresses its policy implications. 3-dimensional informations of Columbus, Ohio are captured from LiDAR data and building boundary informations are extracted from a building digital map. Finally NDVI and temperature data are calculated by manipulating band 3, band 4, and thermal band of LandSat images. Through complicated data processing, 6 independent variables(building surface area, building volume, height to width ratio, porosity, plan surface area) are introduced in simple and multiple linear regression models. The regression models are specified by Box-Tidwell method, finding the power to which the independent variable needs to be raised to be in a linearity. Porosity, NDVI, and building surface area are carefully chosen as explanatory variables in the final multiple regression model, which explaining about 57% of the variability in temperatures. On reducing UHI, various implications of the results give guidelines to policy-making in open space, roof garden, and vertical garden management.

**Keywords** : Urban Heat Island Effect, 3-D City Model, Urban Morphology, Box-Tidwell Transformation

## 1. 서론

우리나라는 지난 몇 십년간 경제성과 효율성을 중시한 도시계획 및 개발로 인하여 자연환경의 파괴, 과밀 개발, 환경오염 등 쾌적하지 못한 도시환

경을 만들어냈다. 이로 인한 도시의 기후생태학적인 변화는 도시외곽 및 농촌과 대별되는 도시만의 독특한 기후현상을 낳게 되었고, 이를 가장 대표하는 것이 도시열섬(Urban Heat Island) 현상이라고 알려져 왔다. 현대 도시는 인공포장면, 콘크리트 구조

\* Ph. D. Candidate, Department of City and Regional Planning, The Ohio State Univ. chun.52@osu.edu

\*\* 서경대학교 도시공학과 교수 hagkim@skuniv.ac.kr(교신저자)

물 등 도시온도를 상승시킬만한 열원을 무수히 포함하고 있으나, 녹지, 오픈스페이스, 수변공간 등 시원한 공기를 생성시킬만한 지역은 여전히 부족한 상황이다. 최근 들어 친환경성·지속가능성을 목표로 삼고 그 간의 도시화로 인한 악영향을 저감하고자 하는 여러 지방자치단체의 노력에도 불구하고, 만족할만한 도시환경의 조성에는 아직도 갈 길이 많이 남아있는 것이 현실이다.

도심열섬현상은 대기순환체계를 저해하는 고밀·고층의 도심지역에서 더욱 두드러지게 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히 여름철의 경우, 이 현상은 추가적인 냉방에너지의 소비로 이어지고, 이는 다시 대기오염의 추가적인 발생과 도시를 재가열하는 악순환으로 이어짐으로써, 도시환경의 지속가능성을 크게 저해하는 것은 물론 인간의 건강까지도 위협하고 있다. 이로 인하여 국내의 지방자치단체는 도시열섬현상의 저감을 위한 대책마련에 지대한 관심을 나타내고 있으며, 관련학계에서도 이 현상의 공간적 분포 및 그 영향인자의 파악을 중심으로 다각적인 연구를 진행하고 있다.

이에 본 연구에서는 도시의 기하학적인 특성에 따른 대기온도의 변화에 대한 통계적 모형을 구축하여 변수별 영향력을 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 위성영상자료를 이용한 대기온도 추정이 수행되고, 3차원 도시모델링 기술을 활용하여 도시기하학적인 변수가 추출되며, 이들 변수를 도입한 통계모형이 추정된다.

## 2. 선행연구 고찰

도시열섬에 관한 선행연구를 연구주제로 구분하면, 온도의 공간적인 분포를 분석한 연구들과 온도의 영향인자를 파악하는 연구들로 구분할 수 있다. 또한 데이터 측면으로 나누어 보면, 관심지역의 실측자료에 기반을 둔 연구들과 원격탐사자료의 열밴드로부터 추정온도치를 이용한 연구들로 구분할 수 있다.

온도의 공간적 분포를 연구한 선행연구들은 주로 도시내·외부의 기온 비교를 통하여 열섬현상을 구체적으로 보여주는 사례가 많다. 이 연구들은 몇 개의 실측지점으로부터 실측되지 않은 지점의 온도를 추정함으로써, 주로 규모가 큰 지역에 대한 기온의 공간적 분포를 분석하는 연구들이다. 이 때 미지의

온도를 추정하는 데 활용된 기법으로는, 기온측정지점의 특정 연월일의 기온을 기초로 내·외삼기법에 의한 등온곡선을 산출하는 방법이 있으며[5][6][13][14][34], 위성영상자료의 열밴드(Thermal Band)의 DN값을 활용하여 격자별 추정온도를 산출하는 방법이 있다[32][35].

도시대기온도의 영향인자를 파악하는 연구로는 토지피복·토지이용 인자, 도시형태적·기하학적 인자 등과의 연관성을 분석하여 수리적 모델을 구축한 사례가 있다. 토지피복·토지이용인자의 영향력에 주안점을 둔 연구들은, 주로 토지피복·토지이용 유형별로 기온자료를 연관시켜 각 유형에 따른 기온의 변이를 설명하는 모형을 구축하였다[1][2][4][8][9][10][16][19][20][31][39]. 이 부류에 속한 연구들은 녹지, 식생지수, 불투수포장면, 수계 등의 변수를 이용하여 도시관리정책에 시사성있는 연구결과를 제공하였다.

도시형태적·기하학적 인자의 기온에 관한 영향력에 관심을 둔 연구들은 3차원 도시 모델링 공간정보기술의 발달로 인하여 최근 들어 많은 진전을 보이고 있다[24][27][29][36][37][38].

도시기하학에 연관된 변수들은 대도시만이 지니는 입체적인 특성을 분석하고자 도입되었는데, 3차원 변수들이 도시열섬현상을 설명하는 데 2차원적인 변수보다 설명력이 높을 것이라는 가정을 전제로 하고 있다. 교외지역과 달리, 대도시는 2차원적으로 매우 다양한 패치(patch)를 포함하며, 3차원적으로 확연히 구분되는 경관생태학적인 모습을 지니고 있다. 따라서 이러한 입체적 특성이 도시열섬현상과 밀접한 관련성이 있다는 것은 자연스러운 추측일 것이다.

2차원적인 변수를 이용한 도시열섬현상에 대한 선행연구들은 건물패턴, 건축물 바닥면적 등과 같은 변수에 관심을 두었다. 특히 토지이용패턴이 단순할수록 높은 정확도의 도시온도를 예측할 수 있는 것으로 분석되었다[20][31]. 대체로 2차원의 공간정보는 일반적인 온도패턴을 분석하는 데 도움이 되지만, 건물밀집구역을 포함하는 복잡한 구역을 분석하는 것에는 한계가 있는 것으로 분석되었다. 최근 들어 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 3차원 도시공간정보를 온도모델에 포함시키고자하는 연구들이 시도되었다[23][37][38]. 이 선행연구들은 3차원 공간정보기술을 이용하여 지표면의 거칠기(rough-

ness)를 나타내는 변수를 추출하여 분석에 활용하였다[23].

이에 본 연구는 선행연구와 달리 다양한 도시기하학적 변수들과 대기온도와의 관련성을 분석하고, 이 변수들을 활용하여 대기온도에 관한 설명모형을 구축하고자 한다. 이를 위해서 LiDAR자료와 건물수치지도를 이용하여 3차원 공간 정보를 구축한다. 특히 건물의 표면적, 부피, 도로폭-건물높이 비율(H/W ratio), 공극률(Porosity) 등의 입체적 공간정보를 추출하여 분석을 진행하고자 한다.

### 3. 연구대상지역 및 연구방법

연구대상지역은 미국 오하이오州的 콜럼버스(Columbus) 도심지역을 선택하였다. 콜럼버스는 오하이오 주의 주도(主都)로써, 2008년 현재 754,000여명의 인구가 거주하며, 인구규모로는 미국에서 16번째의 대도시이다(그림 1).

본 연구에 사용되는 데이터는 크게 세 가지로 나뉘는데, 위성영상자료, LiDAR 자료, 건물수치지도 자료 등이다. 위성영상자료는 2007년 7월 6일에 촬영된 LandSat 자료로 온도자료와 식생지수를 생성하기 위해서 사용된다. LiDAR자료는 2008년 봄에 측정된 자료로써, 3차원 공간정보를 추출하기 위해서 사용된다. 마지막으로, 건물수치지도는 프랭클린 카운티(Franklin County)정부에서 2009년 완료된 자료로써 2차원 건축물 바닥면 자료를 추출하는 데 사용된다.



그림 1. 연구 대상 지역

본 연구에서 사용될 변수를 추출하는 작업은<sup>1)</sup> 첫째 3차원 도시기하정보를 추출하는 부분과 둘째 식생정보를 추출하는 두 부분으로 나눌 수 있다. 3차원 도시공간분석을 위하여 LiDAR데이터와 건물수치지도를 이용하여 3차원 도시모델링을 수행하였다.

LiDAR데이터는 건물의 높이를 추출하기 위하여, 건물수치지도는 정확한 건물의 외곽선을 추출하기 위하여 사용되었다. 불필요한 LiDAR데이터를 제거한 후, 건물의 외곽선과 조합하여 건물의 높이를 계산할 수 있었다. 이 때 각 건물의 외곽선 안에 위치한 LiDAR데이터 중 가장 높은 위치정보에 대해 건물높이로 가정하고, 이를 수치지형모델 (DTM)을 이용하여 보정함으로써 실제 건물의 높이(nDSM)를 계산하였다. 본 연구에서는 자료 추출 및 분석의 용이성을 위해 건물을 박스형태로 가정을 하였다. 비록 건물의 상세한 형태를 추출하는 것은 그 자체로 의미가 있으나, 넓은 도시지역에 대해 기하학적 특성을 세밀하게 추출하기에는 효율성 및 효과성의 문제가 있다. 이러한 현실적인 문제를 감안하여 여러 선행연구들과 마찬가지로 박스형태의 건물을 가정하고, 건물높이를 추출하였다. 이와 같은 과정으로 생성된 34,776동의 건축물정보를 기초로 하여 다양한 도시기하변수를 산출하였다.

도시 식생환경을 고려하기 위하여 위성영상(LandSat TM자료)의 근적외선밴드와 가시광선밴드의 분광차이를 이용하여 식생지수(NDVI)를 산출하였다. 이 지수는 식생의 활력도의 추출을 위해서 사용하는 것이 일반적이나, 불투수면적이나 녹지면적을 파악하는 대리변수로 사용되기도 한다.

이상에서 생성된 모든 데이터를 위성영상자료의 해상도를 480m×480m 크기로 전환하였다. 이는 열밴드의 해상도인 120m×120m 크기의 격자가 포함할 수 있는 공간정보가 지나치게 제한적이어서 이를 이용한 수리적 모형의 구축이 어렵기 때문이다. 즉, 소규모의 격자는 도시의 다양한 특성을 포함하지 못할 가능성이 높다는 것이다. 극단적인 예로는, 하나의 작은 격자는 건축물이외에 다른 어떠한 특성도 포함하지 못하는 경우가 발생되게 된다. 이는

1) 본 사례지역은, 한국의 사정과 달리 대도시지역에 대하여 건물외곽선 및 필지만이 대축척 수치지형도로 구축되어 있어, 상세한 2·3차원 변수는 개인적인 데이터 처리 분석과정에 의해서만 추출될 수 있음.

일반적인 선형회귀모형에서 각 독립변수의 데이터가 회귀선을 중심으로 독립된  $t$ 분포를 갖는다는 가정에 위배되는 것으로, 선형회귀모형의 구축에 어려움이 발생된다는 것을 의미한다. 따라서 보다 넓은 격자를 이용하여 변수들의 다양한 변이가 반영되도록 하는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 일반적인 근린주구 혹은 블록 단위의 격자크기로(약 500m) 분석단위를 재구성함으로써, 대도시 공간특성이 적절히 반영되도록 하였다.

이상과 같은 자료로부터 획득된 도시공간의 2·3차원 변수들을 이용하여 회귀모형을 구축하였다. 우선 각 변수와 온도와의 관계가 비선형일 가능성을 전제로 Box-Tidwell 변환 방법을 통해 독립변수를 지수형태로 변형시키고 이를 이용한 단순회귀 및 다중회귀 모형식을 도출하였다.

Box-Tidwell 변환은 최우도추정(MLE) 기법을 이용한 것으로써 설명변수와 종속변수의 비선형관계를 수치적으로 탐지하여, 비선형관계를 선형으로 변형하여 각 설명변수에 대해 최적의 지수(식 1의  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k$ )을 추정할 수 있게 한다[22]. 여기서 Box-Tidwell 변환으로부터 계산된 지수는 변수들 간의 통계학적 최적의 관계를 유지하고, 설명력을 높이는 역할을 한다. 이 변환방법이 Box-Cox 변형과 다른 점은 종속변수의 변형이 없고 각 설명변수마다 고유의 지수를 가진다는 것이다. 또한, 각 변수마다의 최적화된 지수를 이용하기 때문에 보다 높은 설명력을 지닌 모델을 추정할 수 있다는 점이다(식.1).

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{i1}^{\gamma_1} + \dots + \beta_k X_{ik}^{\gamma_k} + \epsilon_i \quad (1)$$

단,  $Y$ : 종속변수,  $X$ : 설명변수,  $\beta$  회귀계수,  $\gamma$ : 지수,  $\alpha$ : 상수항,  $\epsilon$ : 오차항.

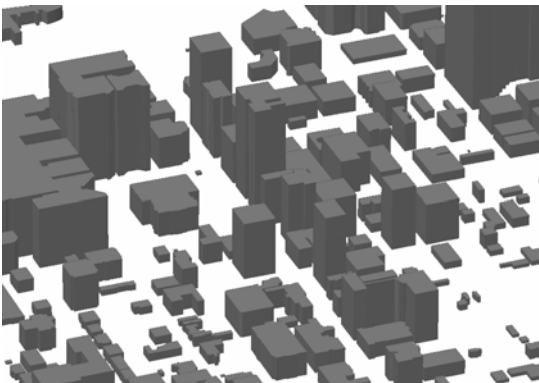


그림 2. 분석대상지역의 3차원 도시 모델

## 4. 도입 변수

본 연구에서는 도입된 변수는 3차원 도시 모델로부터 생성된 변수와 위성영상을 이용하여 생성된 변수로 구분된다(표 1). 3차원 도시모델로부터 생성된 변수는 모두 설명변수로 활용되고, 위성영상으로부터 생성된 식생지수(NDVI)와 도시온도자료는 각각 설명변수와 종속변수로 활용된다.

표 1. 도입변수의 설명

도입변수명	변수설명
<i>Temp</i>	온도
<i>NDVI</i>	식생지수
<i>PAR</i>	격자면적 대비 건물바닥 면적 비율
<i>S</i>	격자내 건물의 총 표면적
<i>V</i>	격자내 건물의 총 부피
<i>AHW</i>	도로폭 대비 건물높이의 평균비율
Prs	공극률(격자부피 대비 건물 총 부피를 제외한 공간의 비율)

### 4.1 종속변수 : 온도

도시온도를 추정하기 위해서 Landsat TM에 의한 열적외선 밴드를 사용하였다. 열적외선 밴드는 120m의 공간 해상도를 가지고 있으며, 개별 격자의 Digital Number (DN)는 0~255의 값을 가지게 된다. DN수치를 실제 온도로 변환하기 위하여 USGS에서 제안한 아래의 변환식 2와 3을 사용하였다[21].

$$Temp = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

$$\text{단, } K_1 : \text{보정상수} = 607.76 \frac{w}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}$$

$$K_2 : \text{보정상수} = 1260.56K$$

$L_\lambda$ : spectral radiance at sensor's aperture

$$L_\lambda = G_{rescale} \times Q_{cel} + B_{rescale} \quad (3)$$

단,  $Q_{cel}$ : DN 값,  $G_{rescale}$ : 0.055158,  $B_{rescale}$ : 1.2378

## 4.2 설명변수

### 4.2.1 식생지수

불투수면과 식생활력도에 대한 분석을 위해서 아래 식을 이용하여 *NDVI*를 산출하였다. *NDVI*는 -1에서 1까지의 값을 갖게 되며, 1에 가까울수록 높은 식생활력도를 나타내고, -1에 가까울수록 그 반대의 의미를 갖게 된다. *NDVI*는 다음 식 4로 구할 수 있다. 이 지수는 선행연구의 결과로 볼 때 도시 온도와는 음(-)의 관계가 발생될 것으로 예상된다.

$$NDVI = \frac{\text{근적외선밴드} - \text{가시광선밴드}}{\text{근적외선밴드} + \text{가시광선밴드}} \quad (4)$$

### 4.2.2 건물바닥 면적비율

단위면적 내 건물이 차지하는 면적을 나타내는 변수는 열섬현상 및 일조권분석에 주로 이용되어왔는데, Yang et al. (2007)[40]는 이러한 변수의 유의미성을 회귀분석을 통해 증명하였다. 건축물의 차지하는 면적이 높을수록 열섬현상이 나타날 가능성이 높으므로, 기온과는 양(+)의 관계가 나타날 것으로 예상된다.

건물바닥 면적비율  $PAR^k$ 은 도시내 건축물 밀도를 나타내는 기초적인 변수로써, 격자  $k$  내 건물의 총 바닥면적( $A^k = \sum A_i^k$ )을 격자면적( $A_T = 230,400m^2$ )으로 나누어 계산한다.

$$PAR^k = \frac{A^k}{A_T} \quad (5)$$

### 4.2.3 건물 부피 및 표면적

건물의 부피와 표면적은 내부의 열저장과 복사 능력과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 이 두 변수는 도시온도상승에 기여할 것으로 예상된다.

식 6은 격자  $k$  내 건물의 총 부피를 계산하는 방법이고, 식 7은 격자  $k$  내 건물의 총 표면적을 도출하는 방법이다.  $PAR^k$ 는 건물의 바닥면적만을 고려한 반면 표면적  $S^k$ 는 건물의 옆면과 지붕을 포함한 면적을 나타낸다. 이 때 표면적 계산을 용이하게 하기 위하여 건물은 모두 박스형태로 가정한다.

$$V^k = \sum_i (A_i^k \cdot h_i^k) \quad (6)$$

단,  $V^k$ : 격자  $k$  내 건물의 총 부피,  $A_i^k$ : 격자  $k$  내 건물  $i$ 의 바닥면적,  $h_i^k$ : 격자  $k$  내 건물  $i$ 의 높이.

$$S^k = \sum_i (P_i^k \cdot h_i^k + A_i^k) \quad (7)$$

단,  $S^k$ : 격자  $k$  내 건물  $i$ 의 표면적,  $P_i^k$ : 건물  $i$ 의 둘레.

### 4.2.4 건물높이-도로폭 비율

도로폭에 대한 건물높이 비율(*HW*)은 거리에 대한 기하구조를 표현하는 가장 대표적인 변수로써, 우리나라 건축법규에서는 일조권 분석 및 사선제한을 적용하는 데 활용된다. 또한 이 변수는 도로와 건물로 이루어진 '도시협곡'의 특성을 반영하는 거리기하구조 변수로 인식되면서, 대기오염의 확산 및 바람길 조성에 관한 모델구축에 있어서 중요한 영향인자로 사용되어왔다[17][18][25][26][28][38]. *HW*의 값이 클수록 지역내 오픈스페이스 및 통기구조의 부족을 표현하는 것이므로, 기온과는 양(+)의 관계를 나타낼 것으로 예상된다.

본래 *HW*는 건물의 높이와 건물사이의 도로폭의 비율로 정의가 되나, 본 연구에서는 대상지(Columbus) 도로폭원자료의 부정확성에 의하여 LiDAR영상을 이용한 새로운 접근법을 이용하였다. 여기서는 각 건물사이의 도로가 아닌 건물과 건물 사이의 거리를 이용하여 *HW*를 계산하였다. 개별건물에 대한 정확한 *HW* 산출을 위해서는 개별건물의 360° 모든 방향에서 *HW*를 계산해야하나, 이로 인해 발생하는 컴퓨터 처리시간 및 알고리즘의 문제를 보완하기 위하여 동서남북의 네 방향으로 이동하면서 *HW*를 계산하고 이를 평균하였다. 이에 각 건물에 대한 *HW*는 다음 식으로 구한다.

$$HW_i = \frac{1}{4} \left( \frac{h_i}{w_1^d} + \frac{h_i}{w_2^d} + \frac{h_i}{w_3^d} + \frac{h_i}{w_4^d} \right) \quad (8)$$

단,  $h_i$ : 건물  $i$  높이,  $w_d^i$ : 건물  $i$ 로부터  $d$ 방향의 다음 건물까지의 거리( $d=1, 2, 3, 4$ 는 동, 서, 남, 북 방향을 의미).

그러나 *HW*는 개별건물에 해당하는 값이므로, 격자별로 해당되는 값을 부여하기 위하여 격자내 전체 건물 *HW*의 평균치(*AHW*)를 구하여 이를 활용한다.

### 4.2.5 공극률(Porosity)

공극률(Porosity)은 도시협곡사이의 건물의 부피를 제외한 공간을 측정하기위한 변수로써, 기온과는 음의 관계가 예상되는 변수이다. 공극률의 분모에는

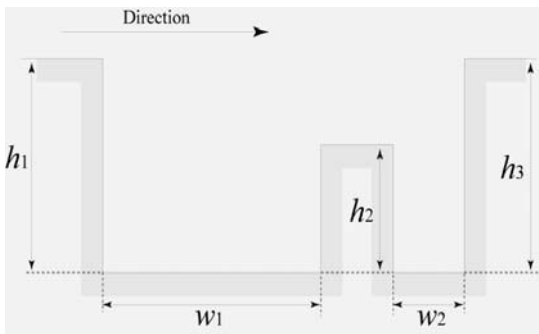


그림 3. HW 변수의 계산도면 예시

격자의 전체 부피가 적용되는데, 격자면적과 격자내 가장 높은 건물높이를 곱하여 계산한다. 분자는 격자부피에서 건물부피를 전부 차감한 것으로 한다. 공극률의 계산식은 아래와 같다.

$$Prs^k = \frac{V_T^k - \sum_{i=1}^n V_i^k}{V_T^k} \quad (9)$$

단,  $Prs^k$ : 격자 k의 공극률,  $V_T^k$ : 격자 k의 넓이와 그 안에 위치한 가장 높은 건물의 높이를 이용한 격자 k의 부피,  $V_i^k$ : 격자 k내 건물 i의 부피

## 5. 모델 추정 결과

### 5.1 단순회귀모형

전술된 데이터 추출방법을 통하여 획득된 종속변수 및 독립변수를 이용하여 단순회귀모형을 구축하였다. 모든 회귀분석의 종속변수는 온도(Temp)이며, 독립변수는 표 1에서 제시된 것처럼 6개의 변수가 활용되었다. 독립변수로 사용된 각 변수는 Box-Tidwell 변환방법이 적용되어 최적화된 지수를 통하여 변환되었고, 이 변환된 변수로 단순회귀모형이 추정되었다.

결과를 보면(표 2 참조), 식생지수를 제외한 나머지 모든 독립변수는 종속변수와의 비선형관계가 확인되었으며, 모든 회귀식은 F검정에 의해 유의한 회귀식임이 인정되었다.

단순회귀분석에 사용된 모든 회귀계수는 1% 유의수준에서 유의함이 인정되었으며, 식생지수를 제외한 모든 변수들은 약 40% 이상의 설명력을 나타내었다. 가장 높은 설명력을 갖는 모형은 건물바닥

표 2. Box-Tidwell에 의한 단순회귀분석

변수	상수항	회귀계수	t값*	지수	R <sup>2</sup>
V	72.967	-63.008	-11.87	-0.024	0.422
S	14.864	4.946	12.24	0.082	0.437
AHW	37.505	-6.605	-12.91	-0.191	0.464
Prs	31.683	-5.092	-11.19	20.352	0.394
NDVI	31.908	-8.216	-7.96	불필요	0.247
PAR	25.740	11.065	15.12	0.460	0.542

\* t값은 모두  $\alpha=1\%$  이하 수준에서 유의함

면적비율(PAR)로 54%의 설명력을 나타내었는데, 이는 건축물이 차지하는 면적이 온도와 높은 관련성이 있음을 보여주는 결과이다. 한편 도시온도를 낮추는 효과가 있다고 알려져 있는 식생지수는 그 설명력이 가장 낮은 25%로 나타났다. 이 결과를 선행연구와 비교해 보면, Reynolds et al. (2008)[33]은 식생지수를 이용하여 도심온도의 변이를 약 60% 정도 설명할 수 있는 것으로 분석하였고, Zhang and Wang (2008)[41]은 그들의 모형이 약 39%의 설명력을 갖는 것으로 분석하였다. 이처럼 본 연구의 결과가 선행연구에 비해 설명력이 낮은 이유는 본 연구 대상지의 특수성에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 본 연구의 대상지가 CBD를 대상으로 하여 토지피복 상태가 타 연구지역보다 상대적으로 변이가 작음으로 발생된 것으로 판단된다.

한편 3차원 도시기하를 반영한 입체변수들(V, S, AHW, Prs)의 추정결과를 비교해 보면, AHW 변수의 회귀모형이 가장 높은 설명력을 나타내고 있다.

각 변수에 대한 회귀계수의 부호가 예상과 동일한 결과인지를 파악하기 위해서는 단순히  $\beta$ 의 부호로 판단하기는 어렵고, 각 회귀모형함수가 증가 혹은 감소 함수인지가 우선적으로 분석된 후 판단해야 한다. 이를 위하여 각 변수의 평균에 대한 탄력성을 계산하였다. 계산된 탄력성은 그 부호로부터 독립변수와 종속변수와의 관계를 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 그 크기로부터 독립변수의 1%변화에 대한 종속변수의 %변화량을 분석할 수 있다.

각 단순회귀모형의 각 변수에 대한 탄력성 계산 결과를 보면(표 3 참조), 탄력성의 모든 부호는 4장에서 언급된 예상결과의 부호와 일치하였다. 공극률(Prs)과 식생지수(NDVI)는 온도의 저감에, 나머지 변수들은 온도상승과 연관이 있는 것으로 추정되었다.

표 3. 변수별 평균에서의 탄력성

변수	설명	탄력계수
<i>V</i>	건물총부피	0.0335
<i>S</i>	건물총표면적	0.0426
<i>AHW</i>	도로폭 대비 건물높이의 평균 비율	0.0431
<i>Prs</i>	공극률	-0.7558
<i>NDVI</i>	식생지수	-0.0575
<i>PAR</i>	건물바닥면적비율	0.0707

탄력성의 크기로 판단해 보면, 공극률이 가장 커 다란 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 공극률의 평균에서 약 1% 증가는 온도를 0.76%정도 감소(약 0.23℃)시킬 수 있는 것으로 예상된다. 실제 도시내에서 단기적으로 공극률을 1%정도 높이는 쉽지 않겠지만, 장기적으로 오픈스페이스 확대, 건폐율 축소 등의 지속적인 도시관리정책으로 달성이 가능하다. 또 다른 온도 저감 요인으로는 *NDVI*를 들 수 있다. 이 *NDVI*는 공원·녹지와 직접적인 관련이 있으므로 이 결과는 공원·녹지정책에 시사하는 바가 크다. 공원·녹지는 도시어메니티 증진뿐만 아니라 도시열섬의 저감을 위해 필수적인 요소이므로 공원·녹지의 확충정책은 지속적으로 실천해야 할 중점과제이다.

온도의 상승요인들 중에서는 건물바닥면적비율(*PAR*)이 가장 큰 영향요인으로 나타났다. 즉, 1%의 *PAR* 증가는 약 0.07%의 온도상승에 기여하는 것으로 나타났다. 한편, 건물 총부피(*V*)와 건물 총표면적(*S*)를 비교해 보면, 건물 부피의 증가보다는 건물 표면적 증가가 온도상승에 더 영향력이 큰 것으로 분석되었다.

전체적으로 탄력성을 볼 때, 도시에서의 오픈스페이스와 같은 여유공간을 나타내는 대리변수들(*Prs*, *PAR*, *AHW*)이 도시의 온도에 대한 영향력이 큰 것으로 확인되었다. 따라서 건축면적을 최소화하고 대기순환이 자유로운 공간구조로 전환시키는 것은 도시열섬을 저감시키는 데 주요한 도시계획방향이 될 것으로 판단된다.

## 5.2 다중회귀모형

전술된 단순회귀분석의 Box-Tidwell 변형으로부터 추정된 각 변수의 지수를 이용하여 다중회귀분

석모형을 구축하였다.

다중회귀모형의 구축에 있어서는, 회귀모형을 왜곡시킬 수 있는 다중공선성(multicollinearity)의 제거 및 회귀계수의 통계적 유의성을 확보하기 위하여 Variance Inflation Factor(VIF)를 계산하여 적용하였다. 일반적으로 VIF의 값이 10이상인 경우 다중공선성이 존재한다고 판단하게 되는데[30] *V*, *PAR* 및 *AHW*의 세 변수들은 이 기준에 따라 모형에서 제외되었다. 이에 다중회귀모형에는 건물 총표면적(*S*), 공극률(*Prs*) 및 식생지수(*NDVI*)가 최종 설명변수로 도입되게 되었다. 최종 모형의 추정 결과는 표 4에 제시된 바와 같으며, 각 변수에 대한 탄력성 계산 결과는 표 5와 같다.

표 4. 다중회귀분석

변수		모형추정결과	
원변수	지수	$\beta$	t
상수항	-	21.014	10.58***
<i>S</i>	0.082	3.456	5.86***
<i>Prs</i>	20.352	-1.199	-1.82*
<i>NDVI</i>	불필요	-5.656	-6.83***
R-Squared Value		0.5688	
관측치의 개수		195	

\*  $\alpha=10\%$ ; \*\*  $\alpha=5\%$ ; \*\*\*  $\alpha=1\%$

표 5. 변수별 평균에서의 탄력성

변수	탄력계수
<i>S</i>	0.0298
<i>Prs</i>	-0.178
<i>NDVI</i>	-0.040

최종 다중회귀모형은 전체 온도 변이량을 약 57% 정도를 설명하는 것으로 나타났다. 공극률 변수만 유의수준 10%(*p* 값: 0.0699)에서 유의한 것으로 나타났을 뿐, 나머지 변수의 회귀계수는 모두 1% 이하의 유의수준에서 유의함이 인정되었다. 비록 높은 설명력을 나타내는 다중회귀모형은 아니지만 열섬현상을 저감하고자 하는 도시관리정책 수립에 활용이 가능한 결과라고 판단된다. 표 5에 제시된 탄력성을 이용하여, 각 변수의 1% 변화에 대한 종속변수의 % 변화를 파악함으로써 기온저감정책

의 효과를 가늠할 수 있다.

건물 표면적의 증가는, 낮 동안 흡수된 태양에너지를 적외선 방사형태로 외부로 다시 내보낼 수 있는 기반을 확대시킴으로써 도시온도상승에 영향을 미치게 된다. 본 회귀모형에서는 1%의 건물 표면적의 증가는 도시온도의 0.03% 상승과 연관이 있는 것으로 나타났다.

이와 반대로, 공극률과 식생지수의 각각 1% 증가는 기온의 0.18%, 0.04%의 감소에 영향이 있음이 확인되었다. 이는 공극률에 관한 통제·관리정책이 온도저감에 가장 큰 효과가 있다는 것을 보여주고 있다. 만약 이 두 변수를 동시에 통제·관리할 수 있다면 더 큰 저감효과를 거둘 수 있음을 시사하는 결과이다. 즉 도시의 공극률이 확대될 수 있도록 많은 오픈스페이스를 조성하면서 이를 모두 녹화, 식재 등을 통하여 식생지수를 높일 수 있다면 시너지 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 오픈스페이스 확보가 용이하지 않은 콜럼버스 도심지역을 감안한다면, 옥상녹화나 벽면녹화 기법을 활용하여 열흡수가 높은 콘크리트 건물의 표면적을 줄이면서 기온 저감을 모색하는 정책이 보다 현실적인 정책대안이라고 볼 수 있다.

이상과 같은 열섬저감정책들은 시행하기 쉽지 않거나 지속적인 노력이 필요한 정책들이기 때문에 다양한 인센티브 정책을 통하여 직·간접적인 유도책이 고안될 필요가 있다. 현재 국내 여러 지방자치단체에서는 옥상정원과 같은 녹화사업에 용적률의 인센티브를 부여하고 있는 것도 그 한 예가 될 것이다. 또한 옥상정원의 건축시공비 일부를 지원하거나 일정 기준 이상의 녹지률을 달성되면 추가적인 용적률 부여하는 것도 고려해 볼 수 있는 정책이라 할 수 있다. 그 밖에도 부산의 서구청처럼 옥상녹화에 관한 조례의 제정으로 실효성을 담보할 수 있는 방안도 고려해 볼 수 있다.

## 6. 결론

본 연구는 2차원적인 도시특성변수를 이용한 기존의 연구와 달리 다양한 도시기하학적인 변수를 획득하여 도시기온에 대한 회귀모형을 구축하고자 하였다. 이를 위하여 도시의 기하구조를 추출할 수 있는 LiDAR자료 및 3차원 도시모델링기법이 활용되었으며 회귀분석을 통하여 종속·독립변수들 간의

관련성을 분석하였다. 회귀모형구축에 있어서는 비선형관계에 있는 변수를 선형화하기 위해 Box-Tidwell 변형기법을 적용하여 최적화된 변수로 변형하여 선형회귀모형을 구축하였다.

단순회귀분석 및 탄력성 계산결과, 모든 변수는 예상했던 결과를 보여주었다. 건물 총 부피, 건물 총 표면적, 도로폭 대비 건물높이 비율, 건물바닥면적비율 등은 기온상승에 관련성이 있는 것으로 나타났다으며, 각 모델은 24.7%~54.2% 정도의 설명력을 갖는 것으로 분석되었다. 한편, 설명변수의 영향력은 공극률, 건물바닥면적비율, 식생지수 등의 순으로 나타났으며, 특히 공극률의 1%증가는 기온의 0.76% 감소로 이어질 수 있는 것으로 분석되었다.

다중회귀분석에서는 다중공선성 및 변수의 유의성 문제로 인하여 건물 총 표면적, 공극률, 식생지수만이 회귀모형에 도입되었다. 모형의 설명력은 높지 않았으나(57%), 열섬현상을 저감시키는 도시정책 수립에 활용될 수 있는 결과가 도출되었다. 건물 총 표면적, 공극률, 식생지수의 각각 1% 증가는 도시온도의 0.03%, -0.18%, -0.04% 변화에 연관이 있는 것으로 분석되었다. 이는 공극률과 관련된 도시특성변수들에 대한 관리정책의 중요성을 인식시키는 결과로 사료된다. 특히 오픈스페이스 확대 정책을 중심으로 도시녹지를 확대시킬 수 정책(예: 옥상녹화, 벽면녹화, 자투리땅 식재 등)을 병행한다면 도시온도저감에 상당한 효과가 있을 것으로 분석되었다.

본 연구에서 도시기하학적인 요소를 반영한 의미 있는 설명모델이 구축되었음에도 불구하고, 다음과 같은 여러 가지 한계점이 존재한다. 향후 이러한 한계가 보완된다면 더욱 기여도 높은 연구가 될 것으로 판단된다. 첫째 현재 회귀모형에 도입된 평면적 혹은 입체적 변수들을 보다 세밀하게 정제할 필요가 있다. 예를 들어 박스형태의 건물, 공극률 등과 같은 변수의 경우, 정확한 건축물의 특성이나 부피가 추출되도록 새로운 방법이 모색될 필요가 있다. 둘째 도시의 환경적·물리적 특성에 대한 변수추출과 도입이 이루어질 필요가 있다. 이 때 도시기온의 상승(예: 포장면적, 열발생시설 등)과 저감(예: 수계, 오픈스페이스 등)에 기여가 예상되는 변수들이 고루 반영될 수 있도록 노력해야 한다. 셋째, 도시의 물리적 특성 외에 여러 비구조적인 특성을 반영하는 대리변수(예: 사회경제학적 변수, 교통변수)가



도입되어 대상지의 특성이 종합적으로 고려된 모형이 구축될 필요가 있다. 넷째, 시계열자료의 확보로, 횡단면분석뿐만 아니라, 시계열모형 및 패널모형을 구축함으로써 도시기온에 대한 다양한 설명모형이 구축될 필요가 있다. 마지막으로 선형모형이외에 비선형 모형에 대한 추가적인 연구가 심층적으로 진행될 필요가 있다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 권영아, 이현영, 2001, “도시 녹지와 그 주변 기온의 공간적 분포 -서울시 종로구 창경궁, 창덕궁, 종묘 주변을 사례로-”, 대한지리학회지, 제36권, 제2호, pp. 126-140.
- [2] 김학열, 2003, “도시환경인자에 따른 대기온도 변화 연구”, 국토계획, 제38권, 제5호, pp. 259-269.
- [3] 류근원, 김근한, 김혜영, 전철민, 2007, “3차원 GIS를 활용한 도시소음 시각화에 관한 연구”, 한국공간정보시스템학회 논문지, 제9권, 제3호, pp. 17-24.
- [4] 박경훈, 전성관, 1999, “광역적 녹지계획 수립을 위한 도시열섬효과 분석”, 한국지리정보학회지, 제2권, 제2호, pp. 25-35.
- [5] 부경은, 오성남, 2000, “1999년 서울지역기온의 시공간 분포 특성”, 한국기상학회지, 제46권, 제4호, pp. 499-506.
- [6] 부경은, 전영신, 박지용, 조하만, 권원태, 1999, “자동기상관측장치자료를 이용한 서울의 기온수평 분포 분석”, 한국기상학회지, 제35권, 제3호, pp. 335-343.
- [7] 송철철, 이우균, 정희성, 이관규, 2008, “토지피복 및 지형특성을 고려한 항공라이다자료의 3차원 표면모형 복원”, 한국GIS학회지, 제16권, 제1호, pp. 19-32.
- [8] 윤민호, 안동만, 2009, “위성영상을 이용한 도시녹지의 기온저감 효과 분석”, 한국조경학회지, 제37권, 제3호, pp. 44-53.
- [9] 윤용한, 2000, “공원에 의한 고온성 저감효과에 관한 연구”, 한국정원학회지, 제18권, 제1호, pp. 83-90.
- [10] 윤용한, 2001, “녹지에 의한 열섬현상의 저감효과에 관한 연구”, 국토계획, 제36권, 제2호, pp. 187-196.
- [11] 윤창락, 김학철, 김경옥, 황치정, 2009, “3차원 GIS 기반 실시간 비디오 시각화 기술”, 한국공간정보시스템학회 논문지, 제11권, 제1호, pp. 63-70.
- [12] 정성은, 이우균, 곽두안, 최현아, 2008, “LiDAR의 높이 및 밀도 정보를 이용한 도시지역의 3D기반 분류”, 한국GIS학회지, 제16권, 제3호, pp. 373-383.
- [13] 최광용, 권원태, “우리나라 열대야 현상 발생의 시·공간적 특징과 최근의 변화”, 대한지리학회지, 제40권, 제6호, pp. 730-747.
- [14] 한영호, 김보현, 이동인, 1993, “부산지역 도심지의 열섬현상과 기온변화에 관한 연구”, 한국기상학회지, 제29권, 제3호, pp. 205-216.
- [15] L. Adolphe, 2001, “A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities”, Environment and Planning B: Planning and Design, Vol. 28, pp. 183-200.
- [16] C. Aniello, 1995, “Mapping micro-urban heat islands using Landsat TM and a GIS”, Computer & Geosciences, Vol. 21, no. 8, pp. 1-13.
- [17] A. Arnfield, 1990, “Street design and urban canyon solar access”, Energy and Buildings, Vol. 14, no. 2, pp. 117-131.
- [18] F. Bourbia, and H. Awbi, 2004, “Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate”, Renewable Energy, Vol. 29, pp. 291-301.
- [19] T. Ca, T. Asaeda, and E. Abu, 1998, “Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park”, Energy and Buildings, Vol. 29, pp. 83-92.
- [20] T. Carlson, J. Dodd, S. Benjamin, and J. Cooper, 1981, “Satellite Estimation of the Surface Energy Balance, Moisture Availability and Thermal Inertia”, Journal of Applied Meteorology, Vol. 20, pp. 67-87.
- [21] G. Chander, and B. Markham, 2003, “Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, no. 11, pp. 2674-2677.
- [22] J. Cohen, and P. Cohen, 2002. Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences. 3rd Ed., Routledge Academic.

- [23] T. Gál, and J. Unger, 2009, "Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area", *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 198-206.
- [24] R. Giridharan, S. Ganesan, and S. Lau, 2004, "Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong", *Energy and Buildings*, Vol. 36, pp. 525-534.
- [25] R. Hamdi, and G. Schayes, 2008, "Sensitivity study of the urban island intensity to urban characteristics", *International Journal of Climatology*. Vol. 28, pp. 973-982.
- [26] J. Herbert, and R. Herbert, 2002, "Simulation of the effects of canyon geometry on thermal climate in city canyons", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 59, pp. 243-253.
- [27] A. Kakon, and M. Nobuo, 2009, "The sky view factor effect on the microclimate of a city environment: a case study of DHAKA city", *Proceeding of 7th International Conference on Urban Climate*. Yokohama, Japan.
- [28] J. Kim, and D. Kim, 2009, "Effects of a building's density on flow in urban areas", *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 26, no. 1, pp. 45-56.
- [29] A. Matzarakis, and H. Mayer, 2008, "Dependence of the thermal urban climate on morphological variables", *Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg* Vol. 17, pp. 129-139.
- [30] J. Neter, M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim, W. Wasserman, 1996, *Applied Linear Statistical Models*, 4th Ed., p. 387, IRWIN. USA.
- [31] J. Nichol, 1996, "High-Resolution Surface Temperature Patterns related to Urban Morphology in a Tropical City: a Satellite-based Study", *Journal of Applied Meteorology*, Vol.35, pp. 135-146.
- [32] U. Rajasekar, and Q. Weng, 2009, "Urban heat island monitoring and analysis using a non-parametric model: A case study of Indianapolis", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 64, no.1, pp. 86-96.
- [33] M. Reynolds, J. Comiso, D. Walker, D. and D. Verbyla, 2008, "Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 112, pp. 1884-1894.
- [34] H. Saaroni, E. Ben-Dor, A. Bitan, and O. Potchter, 2000, "Spatial distribution and micro-scale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel", *Landscape and Urban Planning*, Vol. 48 no. 1-2, pp. 1-18.
- [35] M. Stathopoulou, C. Cartalis, I. Keramitsoglou, 2004, "Mapping micro-urban heat islands using NOAA/AVHRR images and CORINE land cover: An applications to coastal cities of Greece", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, no. 12, pp. 2301-2316.
- [36] M. Svensson, 2004. "Sky view factor analysis - implications for urban air temperature differences", *Meteorological applications*, Vol.11, no. 3, pp. 201-211.
- [37] J. Unger, 2006, "Modeling of the annual mean maximum urban heat island using 2D and 3D surface parameters", *Climate Research*, Vol.30, pp. 215-226.
- [38] J. Unger, Z. Bottyán, Z. Sümegehy, and Á. Gulyás, 2004, "Connections between urban heat island and surface parameters: measurements and modeling", *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, Vol. 108, no. 3, pp. 173-194.
- [39] G. Xian, and M. Crane, 2006, "An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 104, no. 2, pp. 147-156.
- [40] P. Yang, S. Putra, S. and W. Li, 2007, "Viewsphere: a GIS-based 3D visibility analysis for urban design evaluation", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 34, pp. 971-992.
- [41] J. Zhang, and Y. Wang. "Study of the Relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristic factors based on Landsat ETM+ Data", *Sensors*

Vol. 2008, no. 8, pp. 7453-7468.

---

논문접수 : 2010.07.21  
수정일 : 2010.10.14  
심사완료 : 2010.10.20



전 범 석

2003년 인하대학교 토목지리정보공학  
공학사

2006년 오하이오주립대 측지 및 측량  
공학 석사

2009년 오하이오주립대 도시및지역계  
획학 석사(MCRP)

2006년~현재 오하이오주립대 도시 및 지역계획학 석박  
사 통합과정



김 학 열

1999년 오하이오주립대학교 도시및지  
역계획학 박사

2000년~2002년 서울시정개발연구원  
부연구위원

2004년~현재 한국공간정보학회 이사  
2002년~현재 서경대학교 도시공학과 조교수