pISSN : 1226-7147 eISSN : 2383-9171
http://dx.doi.org/10.17208/jkpa.2015.08.50.5.59

Journal of Korea Planning Association Vol.50, No.5 (2015)
대한국토·도시계획학회지「국토계획」제50권 제5호 p.59~72

정규화 지수를 이용한 토지이용에 따른 도시열섬 취약지 특성분석*

- 대구시 주거지역을 대상으로 -

Study of vulnerable district characteristics on urban heat island according to land use using normalized index

- Focused on Daegu Metropolitan City residential district -

김준식** · 이동근*** · 성선용**** · 정승규***** · 박종훈*
Kim, Junsik · Lee, Dongkun · Sung, Sunyong · Jeong, Seunggyu · Park, Jonghoon

Abstract

Using normalized index composition, this study estimated biophysical environment characteristics of urban heat island (UHI) hotspots and identified vulnerable residential district. For this study, we used a regression tree model to examine nonlinear relationships between Land Surface Temperature (LST) and three satellite-based indicators within the UHI clusters: normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference build-up index (NDBI), and normalized difference bareness index (NDBaI). The results show that both NDBI and NDBaI were strongly correlated with the variations of LST whereas NDVI had a weaker correlation with LST in Daegu. In addition, when we analyzed the UHI hotspots by land use type, we found that industrial district showed the highest risk type and central commercial district (CBD) had the second high risk. The most vulnerable residential district was 'Nowon dong, Buk gu'. This site mostly comprised of quasi-residential area type, and we found the high building density ratio is the main reason of urban heat island.

키 워 드 ▪ 취약 주거지, 용도지역, 건축 밀도, NDBI, NDBaI
Keywords ▪ Vulnerable Residential Area, Use District, Building Density, NDBI, NDBaI

Ⅰ. 서 론

도시화 과정에서 나타나는 가장 뚜렷한 도시기후의 변화는 기온의 상승으로, 도시의 성장과 더불어 도시기온이 상승해왔다는 사실은 도시 열섬 현상(Urban Heat Island effect)의 명백한 증거가 된다(Landsberg,1981).

이러한 도시 열섬 현상은 여러 연구들을 통해

* 본 연구는 2015년도 환경부 차세대 에코이노베이션 기술 개발사업(과제번호 : 416-111-014) 및 BK21 플러스 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(서울대학교 협동과정조경학 그린인프라 창조 인재 양성팀)
** Seoul National University (First author: spy1945@snu.ac.kr)
*** Seoul National University (Corresponding author. dklee7@snu.ac.kr)
**** Seoul National University (white109@snu.ac.kr)
***** Seoul National University (skyuno1@snu.ac.kr)
* Seoul National University (hoon73@snu.ac.kr)

인간의 건강과 삶의 질에 직간접적으로 부정적인 영향을 미치게 된다고 알려져 있으며(Baker et al., 2002; Patz et al.,2005), 향후에는 기후변화에 따른 기온상승이 심화될 것으로 예상됨에 따라 도시의 열섬현상을 파악하고 취약지역을 선정하여 대책을 세우는 것이 반드시 필요하다.

이를 위하여, 도시화에 따른 열섬취약지역을 선정하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 선행연구들에서는 도시열섬효과를 분석하기 위하여 지상 관측 자료를 사용하기도 하나 관측지점이 제한적이고 차량통행 및 주변건물에서 발생하는 복사열 등의 미기후적 요인들에 의하여 민감하게 반응하는 단점이 있다. 따라서 외부요건들에 의한 영향을 적게 받으며, 넓은 지역에 대해서 균일한 측정값을 얻을 수 있는 원격탐사를 통한 지표면온도(Land Surface Temperature: LST)에 대한 연구가 널리 진행 되고 있으며(Xiuying Zhang et al., 2009, 지준범 외., 2014), 지표면온도(LST)의 기온에 대한 설명력 역시 매우 높은 것으로 검증되었다(Schwarz et al., 2012).

또한 원격탐사의 특성을 이용하여, 지표면의 분광특성에 따른 관측값과 이들을 조합하여 나타나는 정규화 지수들은 지역의 특성에 따라서 범위가 다르게 나타나므로, 이를 활용하여 도시 열섬 현상을 밝혀내고 지역의 특성을 찾고자 하는 연구들이 일부 진행된바 있다(정길섭 외., 2011, Y Li et al., 2012).

그러나 대부분 이전 연구들에서는 지표면온도(LST)와 토지피복 요소들 간의 상관성을 도출하는데 그쳤고, 도시열섬 클러스터의 특징을 공간적으로 동일하게 취급하는 경향이 있어 도시 내 열섬취약지역의 특징을 정확하게 추출하지 못하였다(Buyantuyev., 2010, Lin Liu et al., 2011).

따라서 본 연구에서는 정규화 지수들(NDVI, NDBI, NDBal)을 기반으로 열섬취약지역의 물리적 환경 특징을 도출하고자 하였다. 이를 위해 도시 내 열섬취약지역의 물리적 환경 특징을 정규화 지수들에 따라 유형화하고, 각 유형별 토지이용 특징을 파악하고자 하였다. 또한 토지이용을 주거지역으로 한정하여, 유형화 결과를 이용해 열섬에 대한 물리적 환경이 취약한 주거지역의 특징을 도출하고, 그 원인을 밝히고자 하였다.

Ⅱ. 연구 범위

1. 공간적 범위

전통적으로 폭염을 대표하는 지역인 대구광역시를 대상지로 선정하였다. 대구시는 오랜 역사를 지닌 도시로서, 구시가와 신시가가 혼재되어 나타나며, 주거지역, 중심상업단지, 공업단지 등이 시 중심에 위치하여 다양한 용도지역이 혼재되어 나타난다는 특징이 존재한다. 따라서 용도지역별 정규화지수 패턴 관찰에 용이하며, 주거지역의 특징 관찰에도 용이하여 대상지로 선정하였다(그림1).

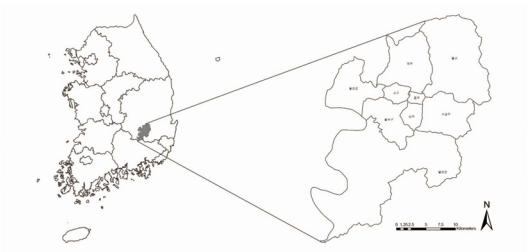

그림 1. 대구광역시 위치
Figure 1. Location of Daegu Metropolitan City

2. 시간적 범위

본 연구에서는 주거지역의 도시 열섬 현상이 가장 문제가 되는 한 여름철을 대상으로 가장 최근의 도시구조를 반영하기 위해 2014년을 시간적 범위로 하였다. 이 중 위성영상의 상태가 양호하고, 운량이

적은 2014년 8월 12일을 선정하였다. 해당날짜의 기온은 다음과 같으며(표1), 해당지역의 14시 AWS 온도 분포를 살펴보면 북구 31.1˚C, 동구 30.9˚C, 수성 30.2˚C, 서구 30.0˚C로 나타났다(그림2).

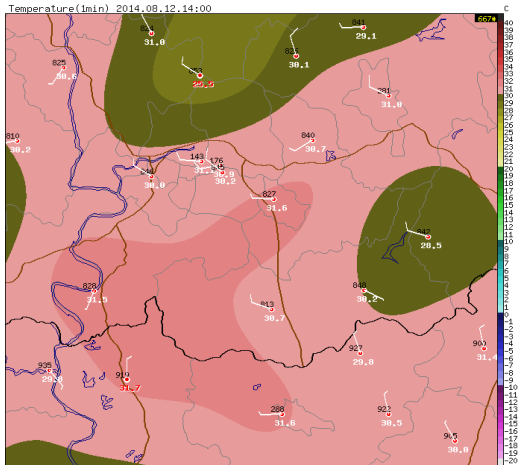

그림 2. 대구 AWS 14시 온도 분포 (14.08.12)
Figure 2. 14:00 AWS air temperature in Daegu (12 August 2014)

표 1. 대구광역시 일별기상자료
Table 1. Daily weather condition in Daegu

일시 Day	평균기온 Mean Temp (℃)	최고기온 Max Temp (℃)	최저기온 Min Temp (℃)	운량 Cloud (%)	강수량 Rain (mm)
August 12, 2014	26.8	32.1	21.6	-	-

*출처: 기상청 (www.kma.go.kr)
*Reference: Korea Meteorological Administration (www.kma.go.kr)

Ⅲ. 연구 방법

1. 연구 흐름

열섬에 미치는 정규화 지수를 선택하는데 있어서 식생을 대표하는 정규화식생지수 (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI), 구조물적 요소를 대표하는 정규화시가화지수 (Normalized Difference Build-up Index; NDBI), 나지를 대표하는 정규화나지지수 (Normalized Difference Bareness Index: NDBal)를 선택하였다.

연구방법은 크게 세 단계를 통해 구성되었다. 첫 번째로 대구전체를 대상으로 지표면온도(LST)와 NDVI, NDBI, NDBal의 상관성을 확인한다. 두 번째로 NDVI, NDBI, NDBal에 관해 K 평균 군집분석을 통해 열섬지역 물리적 환경을 4가지 유형으로 구분하고, 용도지역지구도와의 비교를 통해, 유형별 토지이용 특징을 확인한다. 세 번째로 열섬지역 중 용도지역상 주거지역을 추출하여, 군집분석을 기준으로 열섬에 대한 물리적 환경이 취약한 지역을 선정하고, 고해상도 항공사진과 비교분석을 통해 취약지의 물리적 환경 특징 및 원인 파악한다(그림3).

2. 지표면온도(LST)와 NDVI, NDBI, NDBal 상관관계 분석

1) 지표면온도(LST)

지표면온도(LST) 분석에는 USGS(United States Geological Survey)에서 1999년부터 제공하고 있는 Landsat 7 ETM+ SLC-off 레벨 1의 Band 6를 이

표 2. 연구에 사용된 위성 데이터 특징
Table 2. Characteristic of satellite data using on this study

속성 Attribute	값 value
취득 일시 Acquisition Date and Time	2014/8/12 11:00 am LTC[4]
운량 Cloud cover	5.00%
영상 질 Image Quality	9
태양각 Sun Elevation	60.75°

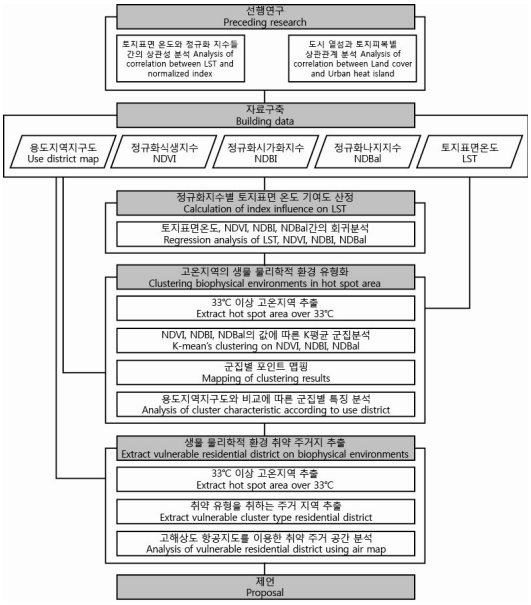

그림 3. 연구 흐름도
Figure 3. Study flowchart

용한다. 본 논문에서 사용한 2014년 8월 12일의 위성영상 정보는 다음과 같다(표2).

Landsat위성자료는 밴드별로 정량화된 복사에너지(Digital Number)로 제공되기 때문에 위성별 밴드 특성을 이용하여 복사에너지 또는 반사도로 변환한다. 따라서 위성자료는 아래의 변환식(Chander et al., 2009)을 이용하여 ENVI 10.1 프로그램을 통해 변환하였다(식1).

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{\max} + L_{\min}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}}\right) \times (Q_{cal} - Q_{calmax}) + L_{\min} \quad (1)$$

여기서 L_λ는 관측된 복사에너지($W/m^2/sr/㎛$)이고, Q_{calmin}는 정량화된 최소 복사에너지(DN=0)이고 Q_{calmax}는 정량화된 최대 복사에너지(DN=255)이며, Q_{cal}은 관측 정량화된 복사에너지(DN)이다. $L_{\min}$은 최소 복사에너지로 $Q_{cal} = Q_{calmax}$일 때 복사에너지($W/m^2/sr/㎛$)이며 $L_{\max}$는 최대 복사에너지로 $Q_{cal} = 0$일 때 복사에너지($W/m^2/sr/㎛$)이다.

식(1)을 통하여 계산된 복사에너지(L_λ)를 이용하여 밴드별 반사도, 지표면온도(LST) 등으로 변환할 수 있다. 복사에너지(L_λ)와 절대온도(K)사이의 관계성을 이용하여 위성관측 온도를 계산한다(NASA Landsat Project Science Office, 2004).

여기서 $T(K)$는 위성관측온도이고 K_1과 L^λ는 보정계수($W/m^2/sr/㎛$)이다. 계산된 위성관측온도를 절대온도(K)에서 섭씨온도로 바꿔주기 위해(℃) 273을 감하였다(식2).

$$T(C) = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273 \quad (2)$$

2) NDVI, NDBI, NDBal

지표면온도(LST)를 연구하는데 있어서 가장 큰 어려운 점 중 하나는, 기여하는 물리적 환경 요소들은 매우 다양하여 정량화하기 매우 힘들다는 점이다. 본 연구에서는 도시열섬에 기여하는 요소들 중 식생 요소로서 정규화식생지수(NDVI), 구조물 요소로서 정규화시가화지수(NDBI), 나지 피복 요소로 정규화나지지수(NDBal)를 선정하고, 아래 식을 통해 도출하였다(표3).

지표면온도(LST)와 NDVI, NDBI, NDBal 자료를 구축하였던 ENVI의 경우 레스터화 된 지도를 추출할 수 있다. 추출된 해당 위성영상을 대구시 시군구, 읍면동 지도와 용도지역지구도와의 상호 이용을 위해서는 데이터별 좌표체계를 일원화 시킬 필요가 있다. 따라서 ArcGIS를 이용하여 Transverse Mercator 좌표체계로 이루어져 있는 용도지역지구

표 3. NDVI, NDBI, NDBal 공식
Table 3. Fomula of NDVI, NDBI, NDBal

속성 Attributes	계산 방법 Calculation Methods
NDVI	(Band4–Band3) / (Band4+Band3)
NDBI	(Band5–Band4) / (Band5+Band4)
NDBal	(Band5–Band6) / (Band5+Band6)

*출처: (Zhang et al., 2009)
*Reference: (Zhang et al., 2009)

도 및 수치지도를 Universal Transverse Mercator 좌표로 변환하였다.

레스터화 된 지표면온도(LST) 지도는 1셀당 1개의 값으로 979,369개의 포인트 데이터로 추출하고, 각 포인트별 데이터를 병합하여, 포인트별 지표면온도(LST), NDVI, NDBI, NDBal 지수 값을 추출하였다.

3) 상관관계 분석

도출한 정규화 지수 값들을 SPSS 프로그램을 사용하여 이변량 상관분석과 회귀분석을 시행하였다. 이를 통해 지표면온도(LST)와 NDVI, NDBI, NDBal 지수와의 상관성을 분석하고, 지표면온도(LST)에 대한 회귀식을 도출하였다.

3. 핫스팟지역의 물리적 환경 유형 분류 및 유형별 토지이용 분석

핫스팟 지역의 물리적 환경 유형 특성을 파악하기 위해 지표면온도(LST)가 33℃ 이상 포인트들을 추출하였다. 33℃ 선정 기준은 기온 33℃ 이상 2일 이상 유지 시 폭염주의보 발령 기상특보 발표기준을 따랐다.

핫스팟 지역의 물리적 환경 유형화를 위해, 정규화 지수들을 K평균 군집분석을 통해 정규화지수들을 유형화하였다. 군집의 차이는 해당 지역의 물리적 환경 요소 중 식생, 시가화, 나지 에 대한 특성을 나타낸다.

K평균 알고리즘은 대표적인 군집화 방법으로서 오랜 역사를 통해 그 유효성이 증명되었으며, 효율적인 구조를 가지기 때문에 많은 환경에서 빠르게 수렴하므로 본 연구에서 사용하였다. 사전 초기 군집 조사를 통해, 초기 군집을 4개로 설정하여 군집분석을 실시하였다.

K평균 알고리즘은 i번째 클러스터의 중심을 μ_i, 클러스터에 속하는 점의 집합을 S_i라고 할 때 전체 분산은 다음과 같이 계산된다(식3).

$$V = \sum_{i=1}^{k} \sum_{jINS_i} |x_j - \mu_i|^2 \quad (3)$$

이렇게 결정된 군집을 ArGIS 프로그램을 이용하여 시각화해서, 각 군집의 분포 패턴을 확인하였다. 또한 이를 지표면온도(LST) 분포와의 비교를 통해 군집 특성을 파악하고, 용도지역지구도와 비교분석을 통해 토지이용 특성을 파악하였다. 용도지역은 위성영상과 동일한 2014년 조사된 국토교통부 용도지역지구도를 기준으로 하였다.

4. 핫스팟지역의 정규화지수 유형화를 통한, 열환경 취약 주거지 분석

위에서 유형화된 정규화 지수 유형화 결과에서 용도지역상의 주거지역(제1종, 제2종, 제3종 일반주거지역과 준주거지역)을 추출하였다. 유형화 결과에서 주거지역만을 추출한 것 중, 취약 유형이 가장 넓게 분포한 지역을 취약지역으로 선정하였다.

이 결과를 지표면온도(LST) 분포, 용도지역지구도와의 비교, 분석하고, 도시구조 특성을 파악하였

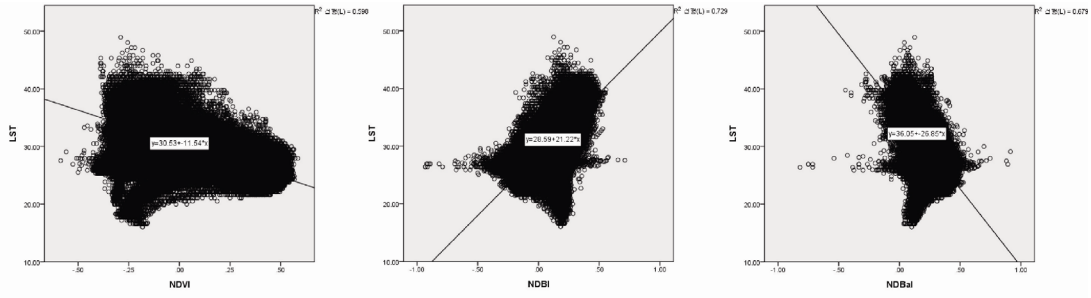

그림 5. 지표면온도(LST), NDVI, NDBI, NDBal 단회귀 분석그래프
Figure 5. Simple regression analysis graph of LST, NDVI, NDBI, NDBal

다. 끝으로 Naver사의 고해상도 항공사진을 이용하여, 취약 주거유형 지역의 현황을 분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 지표면온도(LST)와 NDVI,NDBI,NDBal 상관관계 분석 결과

1) 대구시 지표면온도(LST), NDVI, NDBI, NDBal 산출 결과

지표면온도(LST)의 분포 값을 살펴보면, 도시중심부의 높은 열 중심성을 볼 수 있었다. 특히 북구의 대구 제3공업공단, 서구의 서대구 산업단지, 달서구 대구성서 일반산업단지의 열 중심성은 매우 높은 것으로 나타났다. 또한 북구 제3공업공단으로부터 신천을 따라 열 중심성이 반월당 인근 도시중심부까지 연속되는 형태를 보여주었는데, 반월당 인근은 대구시의 중심 상업지역임을 고려해보면, 이를 통해 도시 외곽지역에 비해, 도심에 열이 집중되는 도시열섬현상을 확인할 수 있었다. 두류공원과 학산공원, 장기공원, 경북대학교 등의 공간들은 도시내부에서 지표면온도(LST)가 매우 낮은 쿨스팟 지점으로 나타났다.

NDVI, NDBI, NDBal의 값들의 분포는 지표면온도(LST)과 유사하거나, 정반대의 분포패턴을 보이는 것으로 나타났고, 이를 통해 세 가지 지수 모두

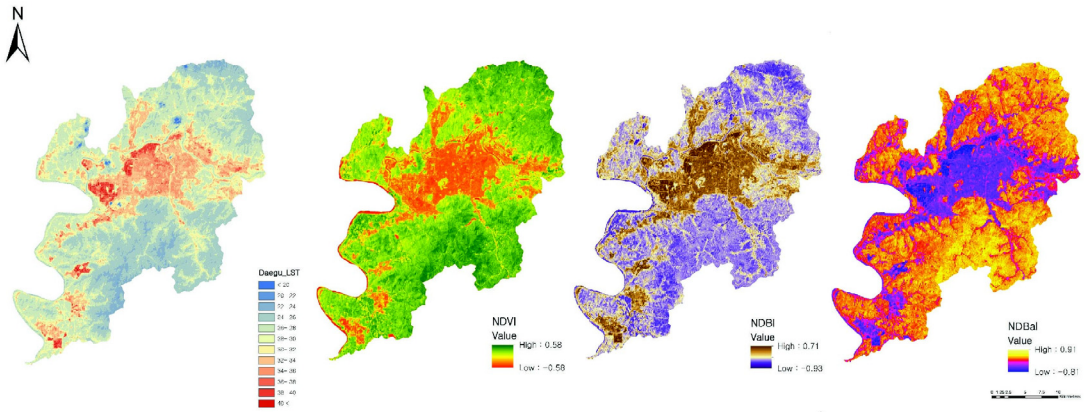

그림 4. 대구시 지표면온도(LST), NDVI, NDBI, NDBal 결과
Figure 4. Results of LST, NDVI, NDBI, NDBal in Daegu

지표면온도(LST)와 높은 연관성을 갖는 것을 파악할 수 있었다(그림4).

2) 대구시 지표면온도(LST), NDVI, NDBI, NDBal 간의 상관관계 분석 결과

대구시 전역의 979369개의 포인트별 지표면온도(LST)와 NDVI, NDBI, NDBal 값에대해 이변량 상관관계 분석을 실시한 결과 지표면온도(LST)의 기술통계량은 평균 28.39℃, 표준편차 3.46으로 나타났고, 피어슨 상관관계의 경우 지표면온도(LST)에 대해서 NDVI는 −0.773, NDBI는 +0.854, NDBal은 −0.824으로 매우 높은 유의미한 상관관계를 나타냈다(표4).

단회귀 분석 결과 NDBI는 높은 양의 상관관계(y=+21.22*x+28.59, R^2=0.729)를, NDBal은 높은 음의 상관관계(y=−11.54*x+30.53, R^2=0.679)를 나타냈으며, NDVI는 다소 낮은 음의 상관관계(y=−11.54*x+30.53, R^2=0.596)를 나타냈다(그림5).

세 가지 변수를 모두 포함한 다중회귀분석을 실시한 결과 수정된 R^2 값은 0.778로 지표면온도(LST)에 대한 설명력이 높은 것으로 나타났다. 유의확률(양쪽)은 모두 .000으로 나타났고, 공선성 역시 10을 넘지 않아 변수선택이 유효한 것으로 나타났다(표5). 다중회귀분석 결과를 통해 나지 비율 증가는 지표면온도(LST)를 크게 감소시키며(B:-12.879, 최대변화폭: 25.758˚C), 건축 밀도 증가는 지표면온도(LST)를 크게 증가시킨다는 것(B:13.563, 최대변화폭: 27.126˚C)을 알 수 있었다. 식생은 단회귀분석과 다르게 나지, 건축 밀도와 비교해서 미미한 영향을 미치는 것(B:0.271, 최대변화폭:0.542˚C)으로 파악되었다. 따라서 도시의 지표면온도(LST) 저감을 위해서는 건축밀도를 낮추고, 나지를 확보하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

표 4. 지표면온도(LST), NDVI, NDBI, NDBal 피어슨 상관계수

Table 4. Pearson's correlation parameters of LST, NDVI, NDBI, NDBal

	LST	NDVI	NDBI	NDBal
LST	1			
NDVI	-.773**	1		
NDBI	.854**	-.785**	1	
NDBal	-.824**	.817**	-.816**	1

**. 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의합니다
**. correlation is significant at the 0.01 level

표 5. 지표면온도(LST)에 대한 NDVI, NDBI, NDBal 회귀분석

Table 5. Regression model of NDVI, NDBI, NDBal on LST

매개변수 Parametersa					
모형 Model	베타값 B	표준오차 S.E.	t-값 t	유의확률 P-value	분산팽창계수 VIF
(상수) (Constant)	32.140	.010	3292.722	.000	
NDVI	.271	.018	14.981	.000	6.48
NDBI	13.563	.021	653.355	.000	3.07
NDBal	-12.88	.042	-304.208	.000	7.43
수정된 R 제곱 Fixed R square		.778			

a. 종속변수: 지표면온도(LST)
a. Dependent variable: LST

이와 더불어 본 연구에서 제외했던 지수였던 정규화습윤지수(Normalized Difference Water Index: NDWI)의 경우 식(4)와 같이 −1*NDBI 값을 취하는데, 지표면온도(LST)와 NDBI의 상관계수가 매우 높은 양의 상관관계로 나타난 것을 통해 NDWI는 매우 높은 음의 상관관계로 나타날 것을 유추할 수 있었다. 이는 도시의 지표면온도(LST) 저감을 위해서는 수역의 증가가 효과적임을 알 수 있었다.

$$NDWI = \frac{(Band4 - Band5)}{(Band4 + Band5)} \quad (4)$$

2. 핫스팟지역의 물리적 환경 유형 분류 및 유형별 토지이용 분석 결과

1) 핫스팟 지역 NDVI, NDBI, NDBal 유형화 결과

지표면온도(LST) 33˚C 이상 열섬지역 추출 결과 979369개의 포인트 중 145836개의 포인트가 33˚C 이상을 나타냈고, 이는 14.89%에 해당했다.

위에서 추출한 핫스팟 지역을 대상으로 K 평균 군집분석을 시행한 결과, 4개의 군집으로 설정한 군집결과는 다음과 같다(표6).

최종 군집 중심 결과, 가장 NDVI 값과 NDBal 값이 낮고, NDBI 값이 높은 군집은 Rule 2로 나타났다. Rule 2 군집은 식생의 비율과 나지의 비율이 적고, 시가화 비율이 높은, 물리적 환경이 가장 열악한 군집으로, 취약한 유형이라고 판단되었다. 즉, Rule2는 도시열섬에 있어서 물리적 환경의 질이 가장 좋지 않은 유형임을 의미한다. 실제로 Rule 2의 평균 지표면온도(LST) 값은 가장 높게 나타났다.

반대로 Rule 4의 경우가 상대적으로 물리적 환경이 양호한 지역이라고 판단되었고, 실제로 평균 지표면온도(LST) 값 역시 가장 낮게 나타났다. Rule 1과 Rule 3의 경우 Rule 3가 상대적으로 물리적 환경이 열악한 지역이라고 판단되었다.

표 6. 핫스팟지역의 정규화지수 유형화 결과
Table 6. Results of Clustering by normalized index in hotspot area

	NDVI 평균 NDVI mean	NDBI 평균 NDBI mean	NDBal 평균 NDBal mean	LST 평균 LST mean	위험도 Risk
군집 1 Rule 1	-0.160	0.173	0.133	34.180	중간 Mediu m
군집 2 Rule 2	-0.163	0.335	0.040	37.033	매우 위험 High-High
군집 3 Rule 3	-0.244	0.248	0.099	34.708	위험 High
군집 4 Rule 4	-0.001	0.124	0.182	33.898	낮음 Low

2) 유형화 결과 시각화 및 기온 분포, 용도지역과의 비교 분석

유형화한 결과를 시각화 시킨 것은 다음과 같다(그림6). 북구와 서구 공업지역 일대에 Rule2가 집중하는 모습을 보였으며, 중심부 일대에 Rule 3가 지배적인 형태를 보였다. 일부 동구 쪽으로 갈수록 Rule 1의 형태가 조금씩 보이기 시작했으며, Rule 4는 도시중심부와 떨어진 외곽지역에서 두드러졌다.

유형화 분포 패턴을 살펴본 결과 지표면온도(LST) 패턴과 대부분 흡사하였고, 일부 지역에서 다소간의 차이를 보였다. 북구, 서구의 공업지역 인근은 가장 취약한 유형인 Rule 2가 지배적인 분포를 나타내 지표면온도패턴과 비슷한데 반면, 고성동 일대나, 서성동 일대 등 도시 중심 상업 지역에서는 Rule 3가 주로 나타났다.

정규화 지수 군집 유형별 토지이용 특성을 파악하기 위해, 국토교통부의 용도지역지구도와의 비교를 실시하였다. 대구 중심지역을 비교분석한 결과 용도지역과 정규화 지수 유형 분포 패턴은 매우 밀접한 관련성을 보였다(그림 7).

비교분석 결과 가장 취약한 유형인 Rule 2의 분포 패턴이 서구와 북구의 일반 공업지역일대 형태와 매우 흡사하게 나타났다. 두 번째로 취약한 군집인 Rule3의 경우가 도심 중심부에서 지배적인 결과를 나타냈는데, 특히 중심상업지역을 중심으로 그 인근 고밀도 주거지역까지 그 영향이 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 비교적 가장 물리적 환경이 열악하지 않다고 판단했던 Rule 4는

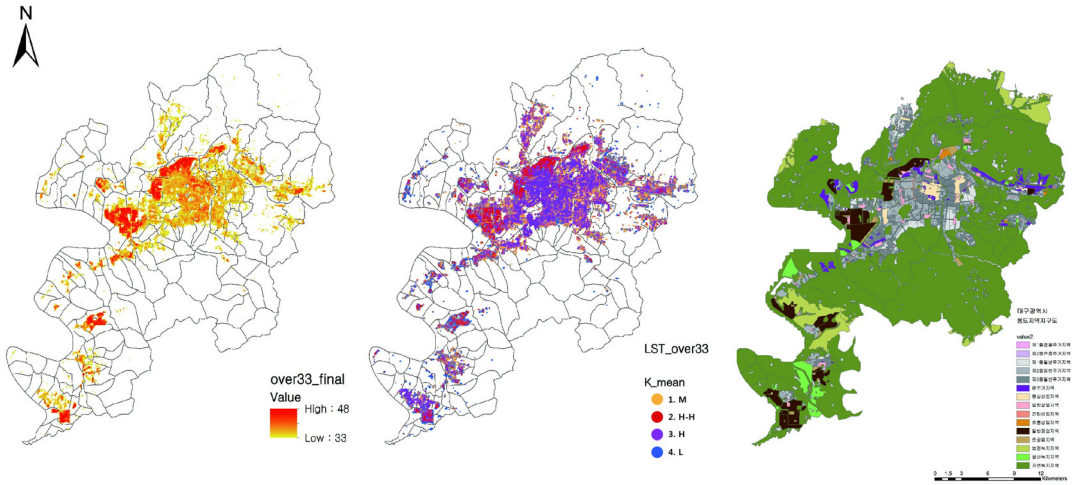

그림 6. 33°C 이상 핫스팟 지역의 지표면온도분포 / 정규화지수(NDVI, NDBI, NDBal) 유형화 분포 / 용도지역지구도

Figure 6. LST distribution in hotspot area over 33°C / Distribution of clustering on normalized index (NDVI, NDBI, NDBal) / Use district map

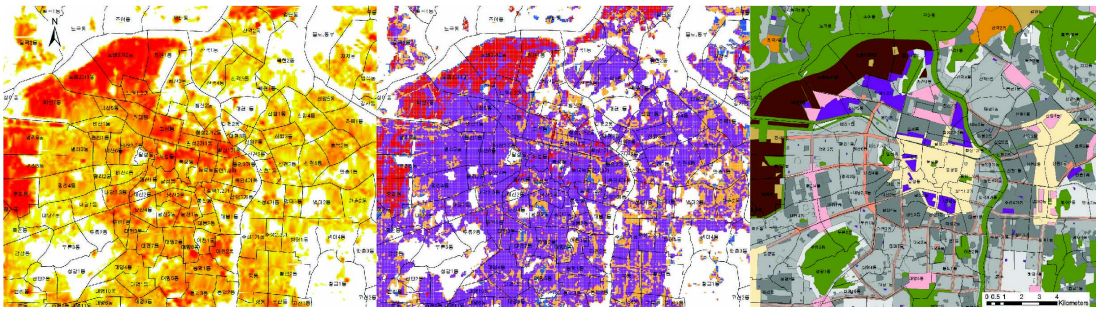

그림 7. 중심지역에서의 지표면온도(LST), 정규화지수 유형화, 용도지역지구도 비교

Figure 7. Comparison of LST, Clustering of normalized index, Use district maps in central area

공원이나 산 인근 지역 혹은 도시 외곽지역에서 주로 분포하는 것으로 나타났다. Rule 1은 세 번째로 취약한 군집으로, 대구시 수성구 만촌2동 인근에서 그 영향이 두드러지는 것을 확인할 수 있었다. 이 지역은 제1종일반주거지역이 지배적으로 분포한 특징을 지닌 지역으로 나타났다.

제1종일반주거지역은 저층주택을 중심으로 한 지역 특징을 지니며, 건폐율은 60% 이하, 용적률은 100% 이상 200% 이하인 특징을 지닌다. 따라서 해당 지역이 다른 고온 지역에 비해 도시 밀도가 낮기 때문에 상대적으로 덜 취약한 Rule3 유형을 나타내는 것으로 판단되었다.

이를 통해 가장 취약한 물리적 환경을 지닌 지역은 공업지역이고, 두 번째로 취약한 지역은 중심상업지역과 인근 고밀도 주거 지역임을 알 수 있었다. 또한 열섬 지역 중 세 번째로 취약한 물리적 환경을 지닌 지역은 제1종 일반주거지역이 대다수를 차지하는 특징을 보였다. 해당지역은 건폐율이 상대적으로 낮아서 건축 밀도가 낮은 특징을 지니고 있는 지역으로, 도시 중심에 비해 상대적으로

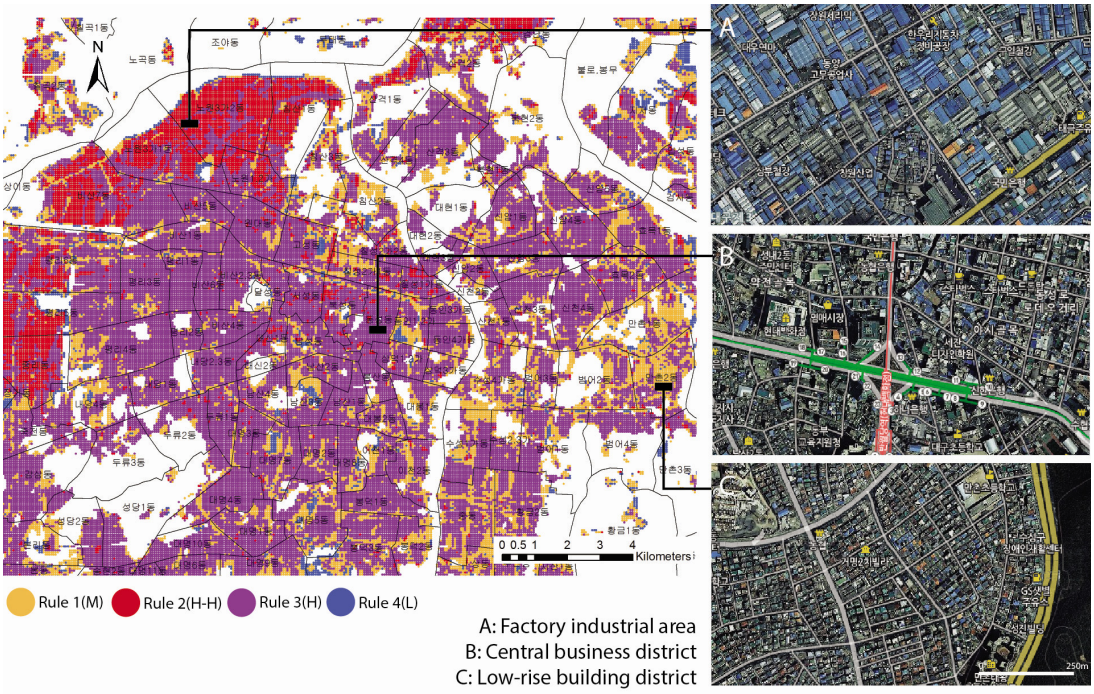

그림 8. 정규화지수 유형화 타입별 특징
Figure 8. Characteristic of normalized index clustering type

낮은 건축 밀도가 결과의 원인이라 판단되었다. 마지막으로 상대적으로 가장 덜 취약한 유형은 도시 외곽 공원 인근 및 도시 외곽 지역임을 알 수 있었다(그림8).

3. 핫스팟지역의 정규화지수 유형화를 통한, 열환경 취약 주거지 분석 결과

도시열섬에 있어서 취약한 물리적 환경을 지닌 주거지역을 추출하기 위해, 토지이용을 주거지역으로 통제하고 분석을 해본 결과, 주거지역 중 가장 취약한 유형인 Rule2 (High-High Risk)가 두드러지게 나타난 지역은 북구 노원 1,2가 지역으로 나타났다. 해당 지역은 주거지역 중 식생이 적고, 나지가 적으며, 건축 밀도가 높은, 열 환경에 가장 취약한 물리적 환경 유형인 Rule2가 압도적인 분포를 보였다.

이러한 결과의 원인은 용도지역지구도에서 찾을 수 있었는데, 해당지역은 건축 밀도를 의미하는 건폐율 기준이 가장 높은 준주거지역이 다른 주거지역과 비교해 다량으로 분포되어 있다는 특징이 존재하였다. 즉, 해당지역의 높은 건축 밀도가 열 환경에 있어서 취약한 물리적 환경 유형을 나타나게 한 원인이라는 것을 파악할 수 있었다.

실제로 고해상도 항공영상을 통해 살펴본 결과 건축물들이 고밀도로 응집하여 있는 것을 파악할 수 있었으며, 식생수준이 불량한 것을 파악할 수 있었다. 따라서 해당 지역은 시급한 개선을 통해 물리적 환경을 보완하여, 열 환경을 개선할 필요가 있다고 판단되었다(그림9).

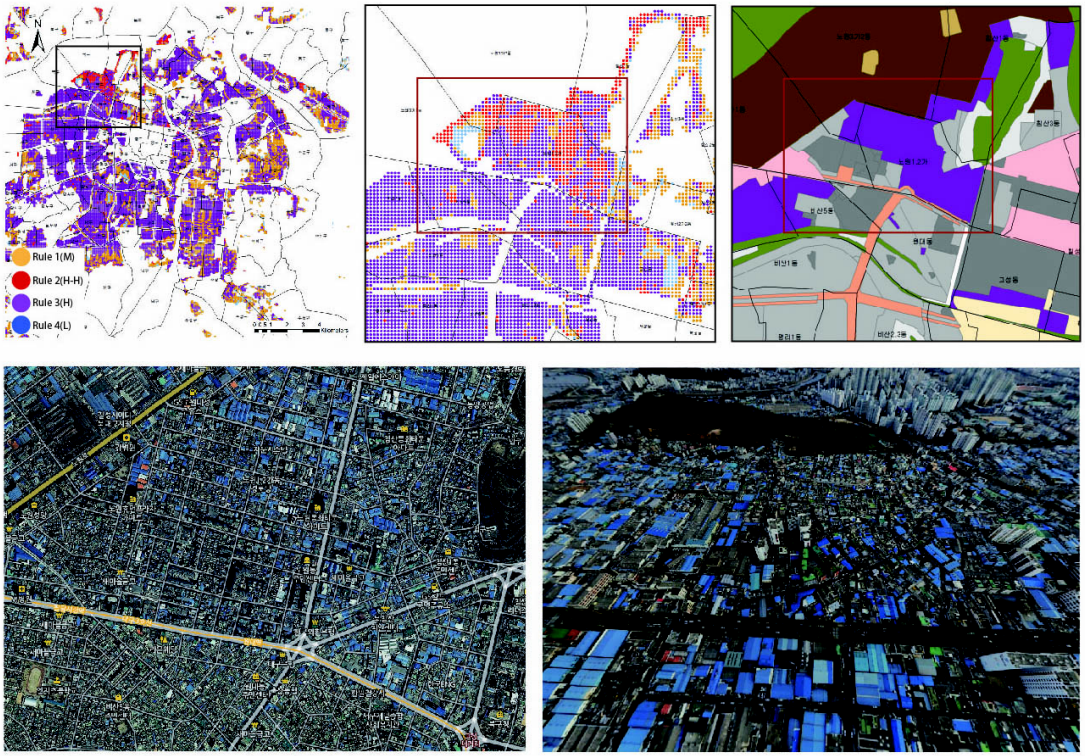

그림 9. 도시열섬 취약 주거지역 추출 및 취약지 특징 분석
Figure 9. Extract urban heat island vulnerable residential district and analysis of site characteristic

V. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, 본 연구를 통해 지표면온도(LST)에 있어서 정규화식생지수(NDVI)와 정규화나지지수(NDBal)가 높을수록 지표면온도(LST)를 낮춘다는 것을 확인할 수 있었고, 정규화시가화지수(NDBI)가 높을수록 지표면온도(LST)를 높인다는 것을 확인할 수 있었다. 특히 NDBI와 NDBal의 영향력이 지표면온도(LST)에 있어서 NDVI에 비해 매우 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 밀집 개발된 건축물들의 증가와 나지의 감소가 도시의 지표면온도(LST)를 급격하게 상승시킨다는 것을 의미하며, 이는 건축 밀도가 토지표면온도(LST)에 절대적 영향을 미친다는 것을 의미한다고 할 수 있다.

또한 정규화습윤지수(NDWI)의 경우 -1*NDBI 값을 취하는 것을 통해, 지표면온도(LST)를 낮추는데 있어서 식생보다 수역의 비율이 지표면온도(LST)를 낮추는데 효과적임을 유추할 수 있었다.

둘째, 열섬지역을 대상으로 정규화지수 유형화 결과와 용도지역지구도를 통해 토지이용을 비교분석한 결과, 공업지역의 경우가 가장 취약한 물리적 환경 유형이 나타나는 것으로 확인되었고(Rule 2: H-H), 중심상업지역과 인근 고밀도 주거지역이 두 번째로 취약한 유형(Rule 3: H)을 나타내는 것으로 확인되었다. 또한 세 번째로 취약한 물리적 환경 유형(Rule1: M)의 경우 상대적으로 건폐율이 다소 낮고, 저층의 형태를 지니는 제1종 일반주거지역이

상당수 나타나는 특징을 보였다. 끝으로 도시 외곽 공원 인근 지역에서 가장 덜 열악한 물리적 환경 유형(Rule4: L)이 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

셋째, 위의 유형분류를 바탕으로 용도지역을 주거지역으로 통제하여, 물리적 열 환경이 취약한 주거지역을 분석해본 결과, 대구시 북구 노원동일대가 가장 취약한 물리적 열 환경을 취하는 주거지역임을 도출하였다. 해당 지역의 유형분류 결과와 용도지역지구도를 비교해본 결과, 건폐율 기준이 가장 높은 준주거지역이 다른 지역에 비해 다수 분포되어 있다는 특징이 존재하였다. 이를 통해 이 지역의 높은 건축 밀도가 열섬에 있어서 취약한 물리적 환경 유형을 나타나게 하는 원인임을 도출하였다.

연구에 있어서 몇 가지 한계점들이 존재하였는데 첫째로, 지표면 온도(LST)와 공기온도와의 차이에 대한 분석은 실시하지 못하였다. 둘째로, 고온기준을 기온 33°C로 설정하였으나, 이는 지표면온도(LST) 고온 기준이 아니라는 점은 한계점이라 판단된다. 셋째로, 단일 시기 영상을 사용함에 따라 대표성의 문제가 존재할 수 있다고 판단된다.

향후의 연구에 있어서는 지표면온도(LST)와 공기온도의 차이에 대한 정량적인 분석을 수반한 연구를 실시할 필요가 있으며, 야간시간의 열 분포를 통해 열대야현상 역시 함께 고려하여 연구할 필요가 있다고 판단된다. 또한 건축 밀도와 도시열섬과의 상관성 분석에 있어서 정량적 방법을 개선, 추가하여 연구가 이루어져야 할 것이며, 도시 구조에 관한 형태, 배치 등의 요소와 도시 열섬과의 상관성 역시 추가적인 연구가 진행되어야 한다고 판단된다.

이러한 연구는 도시열섬 완화에 있어서 정량적 건축 밀도 규제 및 나지확보, 도시공원의 정량적 면적 제안 등을 가능하게 할 것이라고 판단된다. 본 연구 역시 도시 열섬 현상에 대한, 주거지의 물리적 환경의 질을 정량적으로 판단하는데 있어서 새로운 기준작성의 기초자료로서 활용될 수 있을 것이라고 판단된다.

인용문헌
References

1. 지준범, 이규태, 최영진, 2014. “수도권 AWS 기온을 이용한 MODS, Landsat 위성의 지표면 온도 분석”,「대한원격탐사학회지」, 30(2): 315~329
   Jee, J., Lee, K., Choi, Y., 2014, “Analysis of Land Surface Temperature from MODIS and Landsat Satellites using by AWS Temperature in Capital Area”, *Korean Journal of Remote Sensing*, 30(2): 315~329.
2. 이슬기, 정성관, 이우성, 박경훈, 2011. “인공신경망을 이용한 도시기온 예측모형 구축”,「국토계획」, 46(1): 129-142.
   Lee, S., Jung, S., Lee, W., Park., 2011, “A Predictive Model for Urban Temperature using the Artificial Neural Network”, *Journal of Korea Planning Association*, 46(1): 129-142.
3. 정길섭, 구슬, 유환희, 2011.“Landsat위성영상에 의한 용도지역 온도변화분석”, 「한국지형공간 정보학회지」,19(2); 55-61
   Jung, G., Koo, S., Yoo, H., 2011, “Temperature Change Analysis for Land Use Zoning Using Landsat Satellite Imagery”, *The Korean Society for Geospatial Information System*, 19(2); 55-61
4. Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H., 2001. “Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas”, *Solar energy*, 70(3): 295-310.
5. Baker, Lawrence A., et al, 2002. “Urbanization and warming of Phoenix (Arizona, USA): Impacts, feedbacks and mitigation”, *Urban ecosystems* 6(3): 183-203.
6. Buyantuyev, Alexander, and Jianguo Wu, 2010. “Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and

socioeconomic patterns", *Landscape Ecology*, 25(1): 17-33.
7. Chander, G., B.L. Markham, and D.L. Helder, 2009. "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors", *Remote Sensing of Environment*, 113(5): 893-903.
8. Curriero, Frank C., et al, 2002.. "Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States", *American Journal of epidemiology* 155(1): 80-87.
9. Feyisa, Gudina Legese, Klaus Dons, and Henrik Meilby, 2014. "Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: an example from Addis Ababa", *Landscape and Urban Planning* 123: 87-95
10. Gao, B. C., 1996. "NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space", *Remote sensing of environment*, 58(3): 257-266.
11. Katul, G., R. Leuning, and R. Oren., 2003. "Relationship between plant hydraulic and biochemical properties derived from a steady - state coupled water and carbon transport model", *Plant, Cell & Environment* 26(3): 339-350
12. Landsberg, H. E., 1981. "The urban climate", Academic press, (Vol. 28)
13. Li, J. J., Wang, X. R., Wang, X. J., Ma, W. C., & Zhang, H., 2009. "Remote sensing evaluation of urban heat island and its spatial pattern of the Shanghai metropolitan area", *China. Ecological Complexity*, 6(4): 413-420
14. Li, Y. Y., Zhang, H., & Kainz, W, 2012. "Monitoring patterns of urban heat islands of the fast-growing Shanghai metropolis, China: Using time-series of Landsat TM/ETM+ data", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19: 127-138.
15. Liu, L., & Zhang, Y., 2011. "Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong", *Remote Sensing*, 3(7): 1535-1552.
16. Mackey, C. W., Lee, X., & Smith, R. B, 2012. "Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island", *Building and Environment*, 49: 348-358.
17. Nasa Landsat Project Science Office, 2004. "Landsat 7 Science Data Users Handbook", http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf, 184
18. Nikolopoulou, M., & Lykoudis, S., 2007. "Use of outdoor spaces and microclimate in a Mediterranean urban area", *Building and environment*, 42(10): 3691-3707.
19. Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A, 2005. "Impact of regional climate change on human health", *Nature*, 438(7066): 310-317.
20. Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., & Großmann, K., 2012. "Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators—an application for the city of Leipzig (Germany)". *Ecological Indicators*, 18: 693-704.
21. Teillet, P. M., Barker, J. L., Markham, B. L., Irish, R. R., Fedosejevs, G., & Storey, J. C. , 2001 ."Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets", *Remote sensing of Environment*, 78(1): 39-54.
22. Weng, Q, 2009. "Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends", ISPRS *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4): 335-344.
23. W. Mackey, C. W., Lee, X., & Smith, R. B, 2012. "Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island", *Building and Environment*, 49: 348-358.
24. Yoon, M. H., & Ahn, T. M., 2009. "An

application of satellite image analysis to visualize the effects of urban green areas on temperature", *Journal of the korean institute of landscape architecture*, 37(3): 46-53.

25. Zhang, X., Zhong, T., Feng, X., & Wang, K. , 2009. "Estimation of the relationship between vegetation patches and urban land surface temperature with remote sensing", *International Journal of Remote Sensing*, 30(8): 2105-2118.
26. Zhang, Y., Odeh, I. O., & Han, C., 2009. "Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(4); 256-264

Date Received 2015-05-06
Date Reviewed 2015-06-23
Date Accepted 2015-06-23
Date Revised 2015-08-03
Final Received 2015-08-03