Ecology and Resilient Infrastructure (2016) 3(4): 315-321
https://doi.org/10.17820/eri.2016.3.4.315

http://www.kseie.or.kr/
Online ISSN: 2288-8527

ORIGINAL ARTICLE

인천시에서 토지이용이 도시 열 환경에 미치는 영향

Effect of Land Use on Urban Thermal Environments in Incheon, Korea

공학양[1] · 김석현[2] · 조형진[3]*

[1]국립환경과학원 자연환경연구과, [2]클림슨대학교, [3]수생태공간정보연구소

Hak-Yang Kong[1], Seog Hyun Kim[2] and Hyungjin Cho[3]*

[1]National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea
[2]Clemson University, Clemson, South Carolina 29634, USA
[3]ECOnGEO, Incheon 22170, Korea

Received 18 December 2016, revised 23 December 2016, accepted 23 December 2016, published online 31 December 2016

ABSTRACT: To identify the relationship between land use and thermal environment in an urban area, the air temperature was measured at different places of land use, and the changes of land use and air temperature were traced for 40 years in Incheon City. The relationship between land use and temperature was also investigated using satellite image data. The results of temperature measurements on a forest, a cropland (rice paddy), a bareland (school ground), and an urban area (asphalt road) from 19 to 21 August 2014 showed that air temperature was the highest on a pavement road. The temperature increased by about 1.4°C (0.035°C/year) for 40 years from 1975 to 2014 in Incheon. The changes in land use patterns of Incheon for the past 40 years showed that urban dry land, bareland and grassland have increased and cultivated land, wetland and forest land have decreased gradually. The land surface temperature (LST) was correlated with the normalized difference vegetation index (NDVI) and normalized difference built-up index (NDBI) extracted from Landsat satellite image. The land surface temperature was lower at higher NDVI, and higher at higher NDBI. Therefore, it is important to conserve and restore the land use of greenery, wetlands, and agricultural land in order to mitigate the heat island effect and improve the thermal environment in an urban area.

KEYWORDS: Heat island, Land surface temperature, Remote Sensing, Urban environment

요 약: 본 연구에서는 도시 토지이용과 열 환경의 관계를 파악하기 위하여, 인천시에서 토지이용이 다른 곳에서 기온을 측정하였고, 지난 40년간 토지이용과 기온의 변화를 파악하였으며, 위성영상 자료를 이용하여 토지이용과 온도의 관계에 대하여 연구하였다. 2014년 8월 19일부터 21일까지 산림지, 경작지 (논), 나지 (운동장), 시가화지 (아스팔트 도로)에서 온도를 측정한 결과에서 시가화지역이 가장 기온이 높았고 산림지가 가장 낮았다. 인천시에서 1975년부터 2014년까지 40년간 기온은 약 1.4°C (0.035°C/년)이 상승하였다. 지난 40년간 인천시의 토지이용 유형에서 시가화건조지, 나지, 초지가 증가하였고 경작지, 습지, 산림지가 감소하였다. Landsat 위성영상을 이용하여 추출한 지표면 온도 (LST)와 정규식생지수 (NDVI), 정규시가지화지수 (NDBI) 간에 상관관계를 보였다. 지표면 온도는 NDVI가 높은 곳에서 지면온도가 낮았고, NDBI가 높은 곳에서 지면 온도가 높았다. 따라서 도시의 열섬효과를 완화하고 열 환경을 개선하기 위해서는 녹지, 습지, 농경지의 토지이용을 보전하고 복원하는 것이 중요하다고 판단된다.

핵심어: 열섬, 지표면 온도, 원격탐사, 도시 환경

***Corresponding author:** popoin2@daum.net, ORCID 0000-0002-8802-2778

ⓒ Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

도시 열섬 (urban heat island, UHI)은 도시의 인공열이나 대기오염 등의 영향으로 교외 지역보다 기온이 높은 대기가 도시 지역을 섬 모양으로 덮고 있는 형상이다 (Arnfield 2003). 집약적인 도시개발과 이로 인한 녹지의 훼손은 도시의 미기상을 변화시킨다. 식생은 그늘을 만들어 태양 에너지를 차단하고, 높은 반사도, 증발산 및 주변 바람 패턴의 변화를 유발하여 미기후를 냉각시키는데, 이러한 식생이 제거되어 열전도도 및 열보유량이 높고 반사도가 낮은 물질로 대체되면 낮의 태양열을 흡수하여 밤에 현열 (sensitive heat)로 방출하여 열대야 현상을 유발하게 된다 (Arnfield 2003). 또한 밀집된 도시 지역의 불투수층은 건조한 토양 환경을 조성하고, 식생 및 토양의 증발산량을 감소시켜 도시열섬을 악화시킨다 (Coutts et al. 2007).

원격탐사기법이 도시 기후 연구에 도입되면서 위성영상으로부터 추출된 지표면 온도 (land surface temperature, LST)를 도시 열섬현상 및 기온상승을 규명하기 위한 주요한 인자로 활용하고 있다 (Voogt and Oke 2003, Small 2006). 우리나라에서는 Landsat TM 영상을 활용하여 대구광역시의 열섬효과를 식생지수를 통해 규명한 바 있으며 (Park and Jung 1999), ASTER 영상을 이용하여 창원시를 대상으로 도시공간과 야간시간대의 도시 열섬현상을 분석하였다 (Song and Park 2012).

한편 토지이용에 따른 열섬현상에 대한 연구에서 전주시의 열섬현상은 주택단지의 입지와 특성에 따라 차이가 있음을 확인하였다 (Hwang and Kim 2003). 부산의 25년간의 장기적 토지피복변화와 Land 7 ETM+영상과 AWS 자료를 이용한 여름철 도시열섬 포텐셜을 산출한 바 있다 (Ahn et al. 2012). 싱가포르에서는 토지이용에 따라서 열섬효과에 차이가 있었는데, 낮에는 산업지 > 상업지 > 공항 > 주거지 > 공원으로 순서로 밤에는 상업지 > 주거지 > 공원 > 산업지 > 공항의 순으로 기온이 높았다 (Jusuf et al. 2007).

본 연구의 목적은 도시 지역에서 토지이용에 따른 열섬효과의 차이를 파악하기 위하여, 인천시에서 토지이용이 다른 곳을 선정하여 기온을 측정하여 비교하였고, 최근 인천의 토지이용과 기온의 변화를 추적하였으며, 인공위성 영상을 이용하여 토지피복과 온도의 관계에 대하여 조사하였다.

2. 연구 방법

2.1 조사지 개황

본 연구의 조사지는 도서지역을 제외한 인천광역시에서 영종도를 포함한 도심지역을 대상으로 하였다 (Fig. 1). 인천광역시는 인구가 약 300만명으로서 인구 순으로 한국에서 3번째로 큰 도시이다. 인천시는 서울과 경기도와 인접하여 이들 지역과 함께 인구 약 2,000만명의 거대도시를 이루고 있다. 인천의 자연 환경을 살펴보면, 서쪽으로 바다와 접해 있으며 북남 방향으로 계양산으로부터 관모산까지, 남쪽에서 동서 방향으로 오봉산으로부터 문학산과 청량산까지 산지가 발달하여 있다. 산지를 제외한 평탄지는 대부분 공업단지와 주거지로 이용되고 있다.

토지이용 유형에 따른 기온의 차이를 알아보기 위하여 5개 지소에서 기온을 실측하였다 (Table 1, Fig. 1). 부평구 선포산에 위치한 산림에서의 조사지는 산림의 내부 (조

Table 1. Location of measuring site of air temperature in this study.

Site no.	Location	Land use
1-1	Forest inside	Forest
1-2	Forest edge	Forest
2	Paddy	Crop land
3	School ground	Barren land
4	Pavement road	Urban area

Fig. 1. Map showing the study area. The closed circles indicate temperate survey sites (TS) and the closed squares indicate the locations of the automatic weather system (AWS).

사지 1-1)와 경계부 (조사지 1-2)로 구분하였다. 농경지인 논에 위치한 조사지 2는 서구 검암동에 위치하고 있었다. 도심에서는 나지 개방지로서 서구 가좌동에 위치한 가림고등학교 운동장 (조사지 3)에서, 서구 가좌동에 위치한 아스팔트 포장도로 (조사지 4)에서 기온을 측정하였다. 또한 연차별 온도 변화를 파악하기 위하여 기상청에서 운영하는 관측소의 자료를 수집하였다. 기온 자료를 수집한 인천에 위치한 관측소는 서구 금곡동의 금곡, 서구 공촌동의 공촌, 중구 전동의 인천, 부평구 구산동의 부평, 연수구 동춘동의 남동공단 및 중구 운남동의 영종이었다 (Fig. 1).

2.2 조사 및 분석

2.2.1 기온 변화 측정 및 자료 수집

인천 기온은 1975년부터 2014년까지 인천 지역에 위치한 관측소에서 일평균기온을 수집하였다 (KMA 2015). 인천의 토지 피복 유형에 따른 온도 변화를 알기 위해서 2014년 8월 19일부터 21일까지 인천시 내의 대표적인 토지피복 유형별 5 조사지에서 온도 측정 장치 (Pendant Temperature/Light 64K Data Logger, HOBO, USA)를 설치하였다. 온도 측정기는 지상 2 m 높이에 직사광선이 미치는 않는 곳에 설치하였다.

2.2.2 토지 피복 조사

토지피복도는 환경부 환경공간정보서비스 (http://egis.me.go.kr/)에서 2014년에 제작 배포한 중분류 토지피복지도를 7개 항목의 대분류로 변환하여 이용하였다.

2.2.3 열환경 분석

지표온도 추출은 2014년 8월 2일 새벽 2시 11분경에 촬영된 Landsat 8 TM 위성영상을 QGIS 2.6.1의 Semi-Automatic Classification Plugin을 이용해 대기보정을 실시하였다. 대기보정은 DOS1 모델을 사용하였다. 대기보정을 거친 후 열적외선 밴드 (band 10)로부터 지표온도를 추출하였다. 정규시가지화지수 (normalized difference built-up index, NDBI)와 정규식생지수 (normalized difference vegetation index, NDVI)을 각각 Eq. 1과 Eq. 2에 따라서 산출하였다.

$$NDBI = (SWIR\ (band6) - NIR\ (band5)) / (SWIR\ (band6) + NIR\ (band5)) \quad (Eq.\ 1)$$

$$NDVI = (NIR\ (band5) - Red\ (band4)) / (NIR\ (band5) + Red\ (band4)) \quad (Eq.\ 2)$$

2.2.4 자료 분석

연도별 월평균 기온의 시계열 분석을 위하여 R 환경 (ver. 3.3.2) (R Development Core Team 2013)의 'loess' 함수를 사용하여 추세를 계산하고, 'lm'함수로 선형회귀분석을 실시하였다. 토지피복 유형별 조사지간에 온도 차이를 검증하기 위해 R 환경에서 't.test' 함수를 사용하여 유의성 검증을 실시하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 기온의 변화와 공간 변이

본 연구에서 토지피복 유형별 조사지에서 기온을 측정한 결과는 Fig. 2와 같다. 2014년 8월 19일부터 21일까지 온도를 측정한 결과 최고온도는 아스팔트 포장도로에서 35.5°C이었으며 산림내부보다 5.9°C가 높았다. 일평균 온도의 변화가 가장 높은 곳은 산림 경계 지역과 아스팔트 포장도로이었고 가장 낮은 곳은 운동장 (나지)으로 나타났다 (Table 2). 실제 온도 측정결과는 간이설치에 따른 결과이므로 정량적인 변화량을 판단하기에는 무리가 있으며 단지 토지피복 유형간의 상대적 비교자료로 의미가 있을 것으로 판단된다. 온도 평균의 차이를 알기 위해 t 검정을 시행한 결과, 운동장과 산림내부, 논과 산림경계부를 제외하고 모든 장소에서 유의한 차가 있었다. 특히 아스팔트 포장도로와 다른 유형간의 차는 고도로 유의하였다. 토지피복 유형별로 일중 변화를 분석한 결과, 오후 1시에서 3시 사이에 최고온도를 기록하였으며, 특히 아스팔트 포장도로의 경우 3시경에 최고 온도를 나타낸 후 가파르게 온도

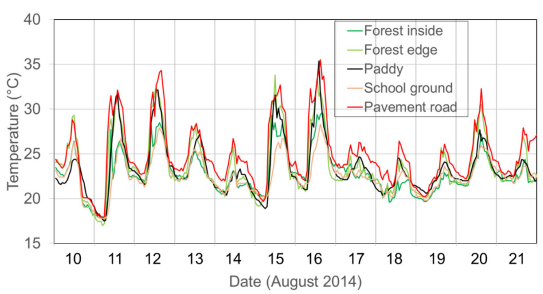


Fig. 2. Changes in temperature measured at the different sites in Incheon City from 10 to 21 August, 2014.

Table 2. Temperature characteristics at the different sites in Incheon City from August 10 to August 2 2014.

Temperature (°C)	Site				
	1-1 (Forest inside)	1-2 (Forest edge)	2 (Paddy)	3 (School ground)	4 (Pavement road)
Mean	22.8	23.7	23.3	22.6	24.9
SD	2.3	3.3	2.9	2.0	3.5
Minimum	17.7	17.0	17.5	17.8	17.9
Maximum	29.6	33.8	35.4	28.3	35.5
Mean of daily difference	5.4	8.6	7.1	4.8	8.5
SD of daily difference	2.9	4.1	4.5	2.4	3.9

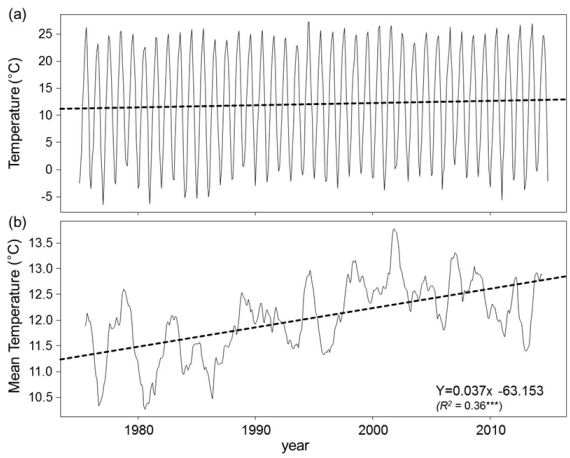


Fig. 3. Time series of monthly mean temperature change in Incheon City for the period of 1975-2014.

가 떨어지는 것을 알 수 있었다 (Fig. 2). 운동장과 산림내부의 경우에는 완만한 온도 상승과 하강 형상으로 비슷하게 나타났으며 논의 경우는 설치장소가 경작지의 중앙이 아닌 외곽 이였기 때문에 인근 도로의 영향을 받은 것으로 판단된다.

인천시 기상청의 월평균 기온 자료의 평균 온도는 최근의 5년 간 평균온도는 1975년 이후 5년간 평균 온도보다 0.7°C 상승했다. 시계열 분석결과 인천시 온도는 매년 0.037°C ($r^2 = 0.36$, $P = 0.001$)씩 상승하였으며 1975년 이후 40년간 인천시 온도는 약 1.4°C 상승 한 것으로 나타났다 (Fig. 3). 이는 인천시 부평구에서 논경작지가 나지로 변화되었을 경우 1.49°C, 시가화 지역으로 변화되었을 경우 0.94°C가 상승하였다는 기존연구 결과와 비슷하였다 (Ki and Lee 2009).

3.2 토지 피복 변화

1975년에서 2014년까지 인천시의 토지피복 유형별 면적이 증가된 것은 시가화건조지, 나지, 초지 순이며 감소된 유형은 경작지, 습지, 산림지이었다 (Table 3). 이중 2014년에 시가화건조지는 1975년 대비 139 km^2가 증가되어 약 4.7배 상승하였다. 이는 서구와 부평구 등의 아파트단지 건설과 송도 신도시 개발로 인해 경작지와 산림지역이 시가화 지역으로 변화하였기 때문이다. 도시개발로 인해 감소된 면적으로는 경작지 63 km^2, 습지 48 km^2이며 2014년 기준 인천시 전체 면적의 약 28%에 해당하였다. 감소한 습지는 주로 하천정비로 감소한 제내지 지역과 토지 개발로 인해 감소한 연안 습지역이었다 (Fig. 4).

3.3 열환경 공간 변이

Landsat 8 TM 위성영상을 이용하여 추출한 지표면 온도 (LST)는 정규식생지수 (NDVI) 및 정규시가지화지수 (NDBI)와 밀접한 관계를 나타내었다 (Fig. 5 및 Fig. 6). 일반적으로 LST는 NDVI 및 NDBI와는 매우 강한 상관이 존재한다 (Guo et al. 2015). 지표면 온도는 시가화지

Table 3. Change of areas (km^2) according to land use pattern in Incheon City.

Land use	Year							
	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2009	2014
Forest	85 (27%)	85 (17%)	87 (27%)	79 (25%)	73 (23%)	68 (21%)	55 (15%)	61 (16%)
Grassland	14 (4%)	18 (6%)	8 (3%)	8 (3%)	8 (3%)	5 (2%)	19 (5%)	36 (9%)
Wetland	60 (19%)	59 (18%)	44 (14%)	17 (5%)	10 (3%)	5 (2%)	24 (6%)	12 (3%)
Waterbody	10 (3%)	7 (2%)	6 (2%)	3 (1%)	2 (1%)	3 (1%)	12 (3%)	14 (4%)
Cropland	109 (34%)	98 (31%)	89 (28%)	84 (26%)	80 (25%)	83 (26%)	49 (13%)	46 (12%)
Urban area	37 (11%)	51 (16%)	73 (23%)	104 (32%)	125 (39%)	141 (44%)	159 (43%)	176 (45%)
Barren land	4 (1%)	1 (1%)	12 (4%)	25 (8%)	22 (7%)	14 (4%)	51 (14%)	46 (12%)
Total	320 (100%)	320 (100%)	319 (100%)	320 (100%)	319 (100%)	319 (100%)	368 (100%)	391 (100%)

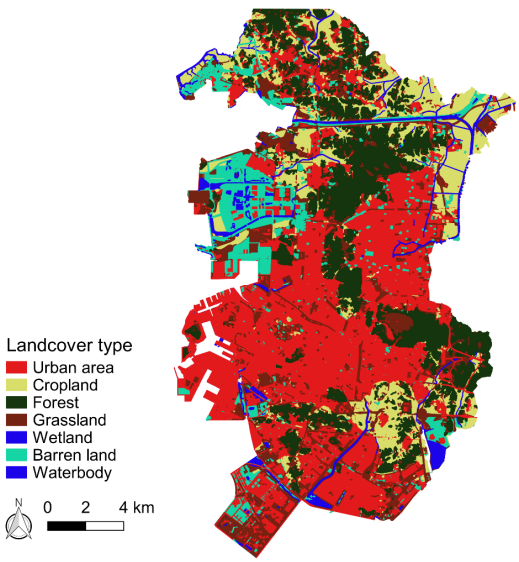


Fig. 4. Land use in Incheon City in 2014.

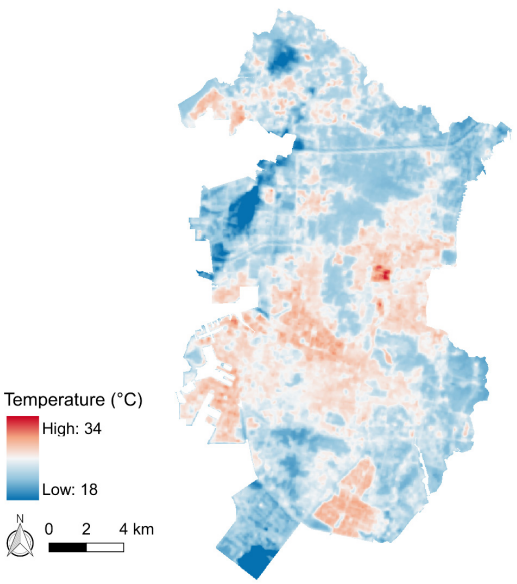
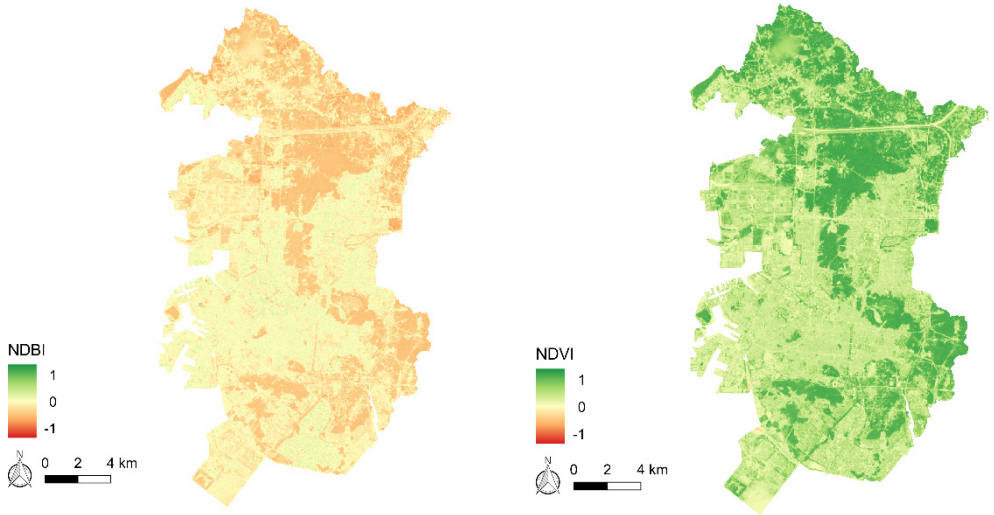


Fig. 5. The spatial variation of land surface temperature (LST) estimated from the analysis of the satellite image in Incheon City. The spatial variation of land surface temperature (LST) estimated from the analysis of the satellite image in Incheon City.

역에서 높았고 산림지역을 따라서 낮았다. 특히 부평구 청천동의 자동차 생산공장에서 가장 높은 온도를 보였다. 한편 경서동과 마전동 일부지역에서 가장 낮은 온도를 보였고, 도시화율에 비해 연수구는 낮은 지표면 온도 분포를 나타내었다. NDVI는 산림지역 중심부에서 높은 값을 가지며 중심지에서 경계부지역으로 낮아졌다. 인천지역의 S자 녹지축인 계양구 계양산부터 남동구 소래산, 남구의 문학산의 한남정맥을 따라서 높은 식생지수를 나타내었다. NDBI는 NDVI와 반대 경향을 나타내었고 시가화지역에서 큰 값을 보였다.



(a) (b)

Fig. 6. The normalized difference built-up index (NDBI) (a) and the normalized difference vegetation index (NDVI) (b) of Incheon City on August 2014.

4. 결 론

본 연구의 인천시에서 토지이용이 다른 곳에서 기온을 측정하여 비교하고, 토지이용의 변화와 기온의 변화를 추적하였으며 Landsat 위성 영상자료를 이용하여 토지피복과 온도의 관계에 대하여 조사하여 인천에서 토지이용에 따른 열섬효과의 차이를 파악하고자 하였다.

인천시의 주요 토지 피복 유형별로 온도 변화를 분석하기 위해 2014년 8월 19일부터 21일까지 산림지, 경작지(논), 나지 (운동장), 시가화지 (아스팔트 도로)에서 온도를 측정한 결과 토지피복 유형중 시가화지역이 가장 높은 온도를 나타내었으며 산림지역과 약 5.9°C 차이를 나타내었다. 일중 온도 변화를 분석한 결과, 오후 1시에서 3시 사이에 가장 높은 온도를 기록하였으며, 아스팔트 포장도로의 경우 3시경에 최고 온도를 나타내었다. 한편 인천시의 기상자료를 분석한 결과 1975년 이후 2014년 기준 40년간 약 1.4°C 상승한 것으로 조사되었다. 토지피복 변화 유형은 시가화건조지의 경우 1975년 대비 139 km^2가 증가되어 2014년 기준 토지피복 유형별 면적의 45%를 차지하였다. 감소된 토지피복 유형은 경작지와 습지 순이었다. 지표면 온도는 식생지수가 높은 곳에서 낮은 온도를 나타내고 정규시가지화지수가 높은 곳에서 높은 온도를 나타내었다. 인천시의 녹지축인 한남정맥을 따라서 지표면 온도는 낮게 나타났다.

인천시의 향후 도시개발 정책에 따라서 열섬현상의 저감 또는 증감이 예측되는 상황이다. 열섬의 반대현상이 냉섬 (cool island) 효과를 유도하기 위하여 녹지 및 습지의 증가와 신선한 외부 공기의 도시 유입을 방해하는 대류체계의 변화를 유도하여 도시의 열 환경을 변화 시켜야 할 것이다. 도심지내 자투리 근린 공원의 확대 및 콘크리트 구조물의 열 함축 및 발산 현상을 저감하기 위해 인공구조물의 녹화 정책이 수반되어야 할 것이다. 최근 도시계획과 도시개발 단계에서 쾌적한 도시 환경조성을 위한 도시지역의 미기후정보에 대한 수요가 증가되고 있는 실정이다 (KEI 2011). 하지만 도시 열섬 현상 저감 대책을 적용하기 앞서, 도시정책은 지역 간의 문화, 환경, 자원, 재정 등의 특성을 종합적으로 고려하여 마련해야 하므로 고해상도 영상을 이용하여 인천시의 토지피복 유형이 점차 시가화지역으로 변화된 지역과 변화되고 있는 지역을 거시적으로 모니터링하고 녹지 유형별로 냉섬현상의 효과를 검증하여 정량적으로 제시할 필요가 있다. 또한 미기후 측면에서 지표면 관측자료를 일시적, 지속적으로 수집할 수 있는 장비 (드론, 원격 데이터 수집장치 등)를 적극적으로 활용하여 도심지역과 외곽지역, 주거밀집지역과 산림 지역 등의 온도 흐름 패턴을 실시간으로 파악하여 열섬현상에 대한 영향 분석이 필요하다. 이런 연구자료들은 한정된 자원과 재정 상황에서 효과를 높일 것이며 지속가능한 인천시의 도시계획 수립과정에 유용하게 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구에서 현장조사를 도와준 가림고등학교 황길연, 이정재, 김보영, 최윤지, 김지현 학생들에게 감사함을 표합니다.

References

Ahn, J.S., Hwang, J.D., Park, M.H. and Suh, Y.S. 2012. Estimation of urban heat island potential based on land cover type in Busan using Landsat-7 ETM+ and AWS data. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 15(4): 65-77. (in Korean)

Arnfield, A.J. 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology 23: 1-26.

Coutts, A.M., Beringer, J. and Tapper, N.J. 2007. Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. Journal of Applied Meteorology and Climatology 46(4): 477-493.

Guo, G., Wu, Z., Xiao, R., Chen, Y., Liu, X. and Zhang, X. 2015. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. Landscape and Urban Planning 135: 1-10.

Hwang, J.-W. and Kim, S.-C. 2003. A comparative analysis on the urban heat island by residential types. Journal of Korea Planning Association 38: 235-44. (in Korean)

Jusuf, S.K., Wong, N.H., Hagen, E., Anggoro, R. and Hong, Y. 2007. The influence of land use on the urban heat island in Singapore. Habitat International 31(2): 232-242.

KEI. 2011. Urban Renewal Strategy for Adapting to Climate Change: Use of Green Infrastructure on Flood Mitigation. Research Report 2011-07. Korea Environment Institute, Seoul, Korea. (in Korean)

Ki, K.-S. and Lee, K.-J. 2009. A study on temperature change profiles by land use and land cover changes of paddy fields in metropolitan areas. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 132:18-27. (in Korean)

KMA. 2015. http://www.kma.go.kr/. Korea Meteorological Administration. Assessed 20 September 2015.

Park, K.H. and Jung, S.K. 1999. Analysis on urban heat island effects for the metropolitan green space planning. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 2(3): 35-45. (in Korean)

R Development Core Team. 2013. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. http://www.R-project .org/. Assessed 1 March 2015.

Small, C. 2006. Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature. Remote Sensing of Environment 104: 168-89.

Song, B.G. and Park, K.H. 2012. Analysis of heat island characteristics considering urban space at nighttime. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 15(1): 133-143. (in Korean)

Voogt, J.A. and Oke, T.R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment 86: 370-84.