

수도권 그린벨트가 지표면 온도에 미치는 영향 분석

김희재*

Analyzing Impact of the Effect of Greenbelts on the Land Surface Temperature in Seoul Metropolitan Area

Kim, Hee-Jae*

Abstract: This study aims to analyze the relations among greenbelt, urban land surface temperature empirically in order to assess the environmental effects of the greenbelt in the Seoul metropolitan area, objectively. For this purpose, this study conducts an empirical analysis of impacts of greenbelt on urban land surface temperature using a multiple-regression model. The main data employed in the analysis include real-time air pollution data, Landsat 8-OLI Landsat imagery data, KLIS data and Jip-gye-gu data. The major findings are summarized as follows. NDVI has a negative (-) correlation with the land surface temperature, and the urban temperature is high in areas with poor vegetation. The land surface temperature is low in residential or commercial areas, while the temperature is high in industrial areas. The temperature is low in green fields, open spaces, and river areas. It is found that the urban land surface temperature is low in the greenbelt zone. In the greenbelt zone, there is an effect that reduces the land surface temperature by 1% on average, as compared to that at the center of the Seoul metropolitan area. Especially, the center of the Seoul metropolitan area, in a range from 0.6% to 1.9% of the average temperature, the temperature gets lower up to approximately 3km from the greenbelt boundary.

키 워 드: 수도권 그린벨트, 환경적 효과, 표면온도, 식생지수, 다중회귀분석

Key Words: Seoul's Greenbelt, Environmental Effect, Land Surface Temperature, Normalized Difference Vegetation Index, Multiple Regression Analysis

1. 서론

도시 성장의 이면에는 여러 가지 형태의 문제점이 수반된다. 그 중 대표적인 문제는 도시 성장에 따른 거주 공간을 찾는 문제와 주택문제, 교통문제, 환경오염문제 등 기존의 도시 환경을 개선하는 문제다. 이러한 문제를 해결하기 위해 사람들은 도시를 재개발하거나, 공간 확보를 위해 새로운 직장과 주거의 위치를 도시 외곽으로 이전 하였다. 그러나 도심지의 높은 지가로 인해 재개발에 소요되는 비용이 높아 도시의 재개발보다는 자연스럽게 교외화 현상으로 확산되었다 (Harvey, 1996).

이와 같이 기존 도시를 중심으로 확산된 도시의 교외화 현상은 무계획적으로 이루어 졌으며, 심지어 다른 도시와 연담화 되어 도시의 크기는 계획 이상으로 점점 더 커지게 되었다. 따라서 정부는 이러한 무분별하고 통제 불가능한 개발로 인한 도시 확산을 방지하기 위해 도시의 성장을 관리하는 그린벨트 정책을 펼치게 되었다.

이러한 배경으로 만들어진 그린벨트 정책은 환경이 보존되고, 도시의 외연적 확산을 방지하

며, 쾌적한 환경을 만들어 주거가치가 올라갈 수 있는 장점을 강조하며 그린벨트 유지의 정당성을 강조하는 사람들(Correll et al., 1978; Lee & Fujita 1997; Lee & Linneman 1998; Lee 1999; Crompton, 2001; Nicholls & Crompton, 2005; Bengston & Youn 2006), 토지공급을 제한함으로써 주택 및 토지가격을 상승시키며, 개인 재산권을 제한하고, 그린벨트로 인한 긴 통근거리와 통근비용을 발생하게 되는 단점을 강조하며 그린벨트 해제의 정당성을 강조하는 사람들의 주장으로 (Knaap, 1985; Black & Hoben, 1985; Segal & Srinivasan, 1985; Nelson, 1985, 1986; Kim, 1993; Hannah et al., 1993; Jun & Bae 2000; Jun & Hur 2001; Bae & Jun 2003; Glaeser & Gyourko, 2003; Jun, 2012) 해제와 존치에 대한 입장이 첨예하게 나뉘게 되었다.

이처럼 지속되는 논쟁 가운데 우리나라에도 1971년 수도권권을 포함한 대도시 주변에 도시의 외연적 확산 방지와 자연 환경 보호, 국가 안보 등의 목적을 갖고 그린벨트가 지정되었다. 그러나 그린벨트로 최초 지정된 이후 과거 40여년 동안 우리나라 전체 그린벨트의 약 28.5%가, 수

* 센테크 객원연구원. 주저자(irex1@naver.com)

도권은 약 9.7%가 해제되었다(권용우 외, 2013). 그린벨트 정책은 끊임없는 논쟁 속에 유지 또는 조정 되어 왔지만 우리나라의 도시공간구조를 결정하는 정책 중 하나이기 때문에 장기적인 안목으로 개선해 나가야 할 필요가 있으며, 특히 지속가능성의 원칙을 갖고 정책을 개선해야 할 필요가 있다. 현재 세계의 많은 도시들이 도시 내부 또는 주변의 녹지 공간 부족, 수질, 대기질 등 환경에 대한 문제에 관심을 갖고 있는데, 이러한 도시의 사람들이 높은 삶의 질을 누리기 위해서는 지속가능한 환경 친화적 도시를 만들어야 한다고 주장하고 있다(권용우 외, 2013). 이러한 점에서 그린벨트는 수도권에 위치하고 있는 마지막 남은 대규모 녹지 공간으로서 지속가능한 환경 친화적 도시를 만들 수 있는 기회라고 볼 수 있다.

지속가능한 개발, 환경 친화적 도시 개발의 관심이 높아지고 있고, 전 세계적인 관심의 초점이 환경임에 비해 국내의 정책들은 아직도 환경보다 개발에 초점을 맞추어 가는 현상을 볼 수 있다. 그린벨트 정책 역시 녹지공간으로서 받을 수 있는 환경적 혜택으로 인식하기보다는 개발의 여지가 남는 토지 또는 개발 억제 등 부정적으로 인식하고 있어 보전보다는 해체에 더 많은 관심을 갖고 있다. 이러한 사회적 현상에 따라 환경적 혜택을 누릴 수 있는 마지막 대규모의 녹지공간인 그린벨트의 환경적 효과에 대해서 국내에서는 아직까지 실증적 분석을 수행한 연구들이 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 수도권 그린벨트의 다양한 환경적 효과 중 지표면 온도의 감소 효과가 있는지를 분석한다. 분석결과를 바탕으로 그린벨트가 나아가야 할 정책적 시사점을 제시하여 그린벨트의 보전적 가치를 뒷받침 하는데 의의가 있다.

2. 이론적 논의

2.1 지속가능한 도시성장관리의 방향

도시성장관리(Urban growth management)는 과도한 성장으로 인해 발생될 수 있는 부정적인 환경적 · 사회적 · 재정적 효과를 최소화하기 위하여 성장을 재분배 하는 정책을 말한다. 우리나라의 도시성장관리의 정책으로는 개발 부담금 제도, 용적률 관련 제도, 도시의 확산을 방지하는 그린벨트 제도 등이 있다(하성규 & 김재익, 2008).

도시성장관리라는 용어는 많은 학자들에 의해 개발과 환경간의 합리적 조정 과정(DeGrove, 2005), 개발이 언제, 어디서, 어떻게 일어나는 것에 대한 예측, 개발의 위치, 시점, 속도, 속성 등

을 규제하는 제도, 개발의 위치, 시기, 비용문제를 다루기 위한 토지 이용 규제, 무 성장(no growth) · 느린 성장(slow growth) · 통제된 성장(controlled growth) · 성장영향관리(managing impact)로 정의되기도 한다(김재익 외, 2004). 또한 Jun(2012)는 개구리 뿔뿔기(leaf-frog)식 개발, 환경적으로 민감한 토지의 도시 용도, 교통 혼잡, 대기 오염을 포함한 도시 확산(Sprawl)같은 바람직하지 않는 도시 문제를 해결하기 위한 수단이라고 정의 하였다. 결국 이들이 주장하는 도시성장관리의 정의는 토지이용 규제 수단 뿐만 아니라 도시 성장의 속도를 제어하고 성장에 필요한 비용의 문제를 해결하는 점에서 공통점이 있다(Kelly, 1993; Nelson & Duncan, 1995; Cho, 2002; 김재익 외, 2004; Jun, 2012).

이러한 도시성장관리의 목표는 도시개발로 인한 오픈스페이스의 감소 및 농경지의 도시용 토지로의 전환 방지, 도시성장으로 인한 교통의 혼잡 가중 방지(urban sprawl 방지), 환경문제에 대한 관심으로 무질서한 개발 및 상업적 개발 등을 통한 생태계의 파괴와 환경오염 예방, 공공부문과 사회간접자본의 비용지출 축소, 그리고 도시민의 생활의 질 향상이다(국토해양부, 2011).

지속가능한 도시의 성장 관리를 위해서는 모든 개발과 도시의 성장이 그 지역의 주민의 환경을 개선시키는 조건에서 이루어져야 한다. 다시 말하면 환경이 악화되지 않는다는 확신이 있을 때에만 개발이 허용되어야 하는 것이다. 앞 절에서 예로 든 지속가능한 주거지역 개선사업의 예시같이 노후한 주거지역의 개선사업에서 기존의 열악한 도시환경을 더 나은 주거환경으로 개선시켜야 하며, 주거지의 고밀화로 수평적 개발을 유발하는 주변 녹지 및 오픈 스페이스(Open Space)의 훼손을 방지하는 동시에 이전보다 더 많은 주거 공간 및 녹지와 오픈 스페이스(Open Space)를 확보하여야 할 것이다. 이와 같이 지속가능한 도시성장관리는 환경의 개선이 항상 동반 되어야 진정한 의미의 지속가능성을 갖고 있다고 볼 수 있다(하성규 & 김재익, 2008).

2.2 선행연구 검토

그린벨트의 효과에 관한 연구는 과거부터 옹호와 비판으로 나뉘어 왔다. 먼저 그린벨트 정책을 비판하는 주장들을 살펴보면 도시성장관리의 그린벨트 정책 같은 토지 이용 규제가 개발 가능한 토지의 공급을 제한하여 그린벨트 안쪽 도시(Inner city)의 고밀화 및 혼잡 등을 초래하였다고 주장하고 있다(Black & Hoben, 1985; Knaap, 1985; Nelson, 1985, 1988; Hannah et al.,

1993; Son & Kim, 1998). 이들이 공통적으로 주장하는 것은 그린벨트가 주택 및 토지 공급 제한으로 이어져 주택과 토지 가격을 상승시켰다는 것이다. 또한 이러한 현상의 결과로 그린벨트로 인해 도시내부가 고밀화 되고, 이에 따른 교통 혼잡으로 인해 자동차 배기 가스량이 증가되어 환경오염을 초래하며, 그린벨트로 인한 직주 분리 현상으로 그린벨트 외곽에 위치한 주거지와 그린벨트 안쪽에 위치한 직장의 통근통행 때문에 자동차 사용량이 많아져 대기오염물질의 양이 증가한다는 주장이다(안건혁 & 운영태, 1997; 전명진, 2001).

반면 그린벨트를 옹호하는자들은 그 이유를 그린벨트가 주는 혜택에 있다고 주장하고 있다. 그린벨트를 옹호하는 학자들의 가장 큰 주장은 그린벨트가 주는 환경 및 생태적 혜택이다. 그린벨트 내부에는 생태적 기능이 있어 멸종위기에 처한 종의 서식지로 사용되고, 대기오염 저감 효과 및 수질오염 개선 효과 등이 있는 것으로 나타났다(Khan & Abbasi, 1999a,b; Daily & Ellison, 2002) 또한 홍수 제어와 산사태 방지 등과 같은 자연 재해로부터 예방하는 효과가 있는 것으로 나타났다(Yokohari et al., 2000). 뿐만아니라 그린벨트는 그린벨트 내부의 숲의 잎이 수용성 오염 물질을 용해 시킬 수 있으며, 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂), 오존(O₃)과 같은 대기오염 물질을 흡수하여 대기질을 좋게 만들 수 있다고 주장하였다. 또한 나무의 이산화탄소(CO₂)의 흡수기능으로 인해 도시의 열섬현상의 원인인 이산화탄소(CO₂)를 감소시켜 도시의 온도를 낮추는데 기여한다고 주장하고 있다(Akbari & Konopacki, 2004).

본 연구와 직접적으로 관련있는 그린벨트와 지표면 온도와와의 관계를 보여주는 연구는 다음과 같다. Buyantuyev & Wu(2010)는 미국의 Phoenix 지역 토지피복과 사회 경제적인 요소들이 도시 온도와 어떤 연관이 있는지 회귀분석과 GWR모형을 이용하여 분석하였다. ASTER영상을 분석한 결과 표면온도는 여름밤을 제외하고 식생지수가 한 단위 상승할 때 온도가 38.9만큼 하락하며, 고도가 높을수록, 수변지역일수록, 토지 피복수가 많을수록, 소득이 높은 지역일수록, 주택년수가 오래된 지역일수록 온도와 부(-)의 관계에 있으며, 지표 포장비율이 높은 지역과 인구밀도가 높은 지역일수록 표면온도는 높아지는 것으로 나타났다. Li et. al. (2012)의 연구는 중국 Beijing의 녹지공간이 표면온도에 미치는 영향에 대하여 회귀분석과 공간계량모형 중 하나인 공간자기회귀모형(SAR: Spatial Autoregressive Model)을 이용하여 분석하였다. 분석에 사용된 위성영상은 Landsat5의 120m의 해상도를 갖는

영상이다. 분석 결과 표면 온도는 녹지공간비율이 1% 증가할수록 0.86°C 하락하는 것으로 나타났다. Heint et al (2015)의 연구에서는 이탈리아 South Tylon지역의 도시와 농촌의 표면 온도의 변화량을 결정하는 요인을 회귀분석을 이용하여 분석하였다. 분석결과 식생지수변화량이 커질수록 표면 온도 변화량은 줄어들며, 잔디비율이 1% 증가할수록 온도변화량 0.219°C 만큼 줄어드는 것으로 나타났다. Klok et. al. (2012)의 연구에서는 네덜란드 로테르담 지역을 대상으로 열섬화 현상과 도시 표면 특성과의 관계를 회귀모형을 이용하여 분석하였다. 분석 결과 표면온도는 불투수면 비율이 높을수록, 물의 비율이 많을수록 온도가 올라가며, 고도가 높을수록, 녹지면적 비율이 1% 증가할수록 1.3°C 내려가는 것으로 나타났다. Lee, et. al. (2009)는 우리나라 서울을 대상으로 도심(CBD: Central Business District area)의 도시공원에서 대기온도 변화의 효과를 온도 경사도를 이용한 횡단면 분석을 하였다. 대기 온도는 도시 내부의 대기온도 측정소의 데이터를 사용하였으며, 분석결과 서울은 단독주택 지역에서 온도가 상대적으로 낮게 나타나며, 고층의 상업지역에서 온도가 높게 나타난다. 그러나 선정릉 같은 도시 묘지공원에서 도심의 온도가 많이 낮아지는 것으로 나타났다. Oliveira et al (2011)의 연구에서는 포르투갈 Lisbon 지역의 녹지공간이 도시 열섬 현상 완화에 대한 효과를 회귀분석과 분산분석(ANOVA)을 이용하여 실시하였다. 도시 측정소의 측정온도를 데이터로 사용하였으며 분석 결과 도심 중앙에 위치한 공원은 도시의 온도를 낮춰주는 쿨링(Cooling) 효과가 있으며, 풍속이 빠를수록 온도 저감 효과는 크다. 또한 그늘진 곳과 맑은 곳에서의 온도 차이는 평균복사온도(TMRT)에 의해 발생하였다. Mallick et al (2013)은 인도의 Delhi 지역의 토지 표면 및 토지 투수성과 도시 열섬 현상과의 관계에 대하여 온도 경사도를 이용한 횡단면 분석을 실시하였다. 사용된 위성영상은 Landsat7의 15m 해상도를 갖는 영상이다. 분석 결과 도시 온도는 농촌지역, 저밀주거지역, 미개발지에서 낮으며, 개발지, 상업 및 공업지역에서 상승하는 것으로 나타났다. 또한 불투수성이 높은 지역에서는 온도가 높게 나타났다.

Fan, et. al. (2015)의 연구는 미국 Phoenix 지역을 대상으로 도시 식물의 공간적 분포와 계절적으로 표면온도에 미치는 영향에 대하여 회귀분석과 Moran's I 검정을 통해 공간적 군집 정도를 분석하였으며 ASTER 위성영상으로 표면온도를 추출하였다. 분석결과 겨울보다 여름이 잔디와 나무가 심어져 있는 부분에서 온도감소효과가 더 크며 밤보다는 낮이 감소효과가 더 크

게 나타났다. 또한 여름의 낮은 잔디와 나무가 한 단위(Pixel) 많아질수록 각각 4.526, 8.877°C 증가하는 것으로 나타났다.

그린벨트가 표면온도에 미치는 효과에 관한 대부분의 선행연구들은 종속변수를 대부분 지표면온도를 사용하였으며, 표면온도에 미치는 요인들을 회귀분석 또는 공간회귀분석을 이용하여 분석하였다. 공통적으로 사용된 변수들은 토지 이용, 인구 및 가구, 녹지, 토지 피복, 지역 특성, 물리적 환경, 대기 오염 등이 사용되었다. 또한 표면온도를 위성영상인 Landsat 또는 ASTER 영상을 사용하거나 도시 온도 측정 데이터를 이용하여 보다 분석의 정확성을 높였다. 분석 결과 토지이용 특성에서 상업과 공업지역은 도시 열섬효과에 기여하는 것으로 나타났으며, 주거지역에서는 대체로 온도가 낮아지는 것으로 나타났다. 인구 및 가구 특성에서는 인구나 고용자수, 또 그에 대한 밀도가 늘어날수록 표면온도는 높아지며, 토지 피복 특성에서 경관지수가 좋을수록, 하천·강에 가까울수록, 토지의 투수성이 좋을수록 온도가 낮아지는 것으로 나타났다. 지역 특성으로는 도시지역일수록 온도가 높은 경향이 있으며, 물리적 환경 특성으로 고도가 높을수록, 풍속이 빠를수록 온도가 낮아지는 경향을 보였다. 그리고 본 연구의 관심사인 녹지의 특성에서는 식생지수(NDVI : Normalized Difference Vegetation Index)가 높을수록 온도가 내려가며, 숲, 공원, 녹지지역에서 온도가 현저히 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다.

이렇게 기존의 선행연구들은 도시 공간의 특성과 지표면의 특성이 대기오염과 지표온도에 미치는 효과와 그 요인들까지도 파악하는데 충분이 이루어 졌으며, 특히 녹지공간이 대기오염 물질의 양을 감소시키고 표면온도를 낮추는데 기여한다는 사실을 확인할 수 있었다.

그러나 기존의 연구들은 녹지공간이 환경에 미치는 요인을 도시의 물리적 요인으로 바라본 한계가 있다. 도시 환경에는 물리적 요인 뿐만 아니라 사회 경제적 속성도 같이 미치고 있으며, 무엇보다 우리나라 그린벨트를 대상으로 한 환경적 효과에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 그린벨트가 온도에 미치는 영향에 대해 보다 정확한 분석을 위해 사회 경제적 요인을 포함한 다양한 요인들을 포함하여 분석하고 그 결과를 바탕으로 그린벨트의 환경적 효과에 대한 정책적 시사점을 제시하는 것에 의의를 갖는다. 분석에 활용될 데이터의 측면에서 분석 정확도를 높이기 위해 미시적 수준 단계(Micro level)의 데이터를 활용하여 분석한다. 사회 경제적 속성을 위한 수도권을 4만여 개의 구역으로 나뉜 집계구 데이터를 사용할 것이

며, 위성영상 자료인 LANDSAT8-OLI를 이용하여 해상도 30m의 정교한 데이터를 바탕으로 표면온도 및 식생지수를 추출한다. 공간적으로 세분화된 데이터를 분석에 이용하였기 때문에 기존 연구보다 미시적으로 분석이 가능하다는 장점이 있다. 분석 결과를 바탕으로 우리나라의 수도권 그린벨트가 갖는 환경적 의의에 대하여 강조하고, 수도권 그린벨트의 환경적 혜택을 누릴 수 있는 정책적 시사점 및 대안을 제시 할 수 있는 점에서 차별성을 갖는다.

3. 수도권 지표면 온도와 식생지수

3.1 개요

수도권 그린벨트 지역의 지표면 온도를 추출하기 위해 최근 활발하게 진행되고 있는 도시의 표면 피복온도와 식생지수를 분석하는 과정에서 위성영상 데이터를 주로 활용하고 있다. 도시의 온도를 측정하는 측정소가 있어 그 자료를 이용할 수 있지만 이는 각 지역에 국한되고 지역 평균값을 적용해야 하는 한계가 있다.

본 연구는 LANDSAT 8 OLI(Operational Land Image) 센서의 영상을 추출하여 사용하였다. 본 영상 데이터는 미국지질조사소(U.S.GS: United Stated Geological Survey)에서 전 세계 위성영상 데이터 중 일부를 공개하고 있다. LANDSAT 8 OLI 영상은 9개의 다중분광밴드로 이루어져 있으며, 15m의 공간 해상도를 갖고 있는 Panchromatic 센서와 30m×30m의 공간 해상도를 갖고 있는 Multispectral 센서를 갖고 있어 공간적으로 미시적인 분석이 가능하다(Li et al, 2014).

본 연구에서 사용된 LANDSAT 8 OLI 위성영상 데이터와 한국 토지이용 정보 시스템(KLIS: Korea Landuse Information System) 자료 및 다른 변수들의 시간적 범위를 고려하고 데이터 구득 가능 시기 등을 고려하여 2014년 9월 19일의 수도권에 위치하고 있는 위성영상(WRS-2: path 116, row 34) 데이터를 이용하였다. 또한 본 시기의 데이터는 구름의 양(Cloud cover)이 0.17%에 불과해 데이터의 손상 없이 사용할 수 있다.

LANDSAT 8 OLI 위성 영상은 보통 Level 1T(terrain-corrected)의 상태로 제공된다. 따라서 위성 영상에서 구름이나 비, 눈 같은 부분이 겹쳐 있으면 분석이 어렵게 된다. 따라서 본 위성 영상 데이터를 연구에 사용하기 위해서는 먼저 구름 같은 Noise를 제거하는 작업을 우선시해야 한다(Zhu et al., 2012). LANDSAT-8 OLI 위성영상은 기존의 위성들에 비해 Quality Assessment Band를 추가로 갖고 있는데, Quality Assessment Band에는 영상 취득시기의 지표상태, 대기, 구름

등의 색상 등을 이용하여 노이즈(Noise)를 제거할 수 있다. 또한 본 분석의 목적에 맞도록 구름 등의 노이즈(Noise) 이외에 하천의 경우 지표온도를 왜곡할 수 있어 제거하였다.

3.2 지표면 온도

이 LANDSAT영상을 활용하여 지표면 온도를 추출하는 과정은 밴드별로 정량화 된 DN(Digital Number)로 제공하기 때문에 밴드의 특성을 이용하여 복사 에너지 또는 반사도로 변환된다(U. S. GS, 2015). 이 과정은 다음의 모형과 같다.

$$L_{\lambda} = A Q_{cal} + B$$

여기서 복사 에너지 L_{λ} 는 TOA(Top Of Atmosphere)의 분광 휘도(Spectral radiance)를, A 는 밴드(Band)특성의 multiplicative rescaling, Q_{cal} 은 양자화와 교정된(Quantized and calibrated) 표준 standard product pixel 값을, B 는 Rescaling이 추가된 밴드특성을 의미한다.

위의 모형에서 계산된 복사에너지 L_{λ} 은 절대 온도 K 와의 관계식을 통해 섭씨온도 $^{\circ}C$ 로 변환되게 된다.

$$T(K) = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}$$

여기서 $T(K)$ 는 절대온도인 위성휘도온도(Satellite brightness temperature)를, L_{λ} 는 TOA(Top Of Atmosphere)의 분광 휘도(Spectral radiance)를, K_1 과 K_2 는 밴드 특성별 열 전환 상수(Band-specific thermal conversion constant)를 의미한다(U.S.GS, 2015).

위의 변환 식을 거쳐 ArcGIS 소프트웨어를 이용하여 Figure 1과 같이 표면온도를 추출하였다. 추출된 표면온도는 최저 15 $^{\circ}C$ 에서 최고 46 $^{\circ}C$ 로 분포되어 있는 것을 알 수 있으며, 서울을 중심으로 인천, 경기도 서남부 지역을 중심으로 온도가 높으며, 특히 공장이 밀집되어 있는 서해안의 인천 및 경기 화성지역의 온도가 높은 것으로 나타났다. 반면 경기도 동부 및 북부지역을 중심으로 온도가 낮은 것으로 나타났다. 이는 수도권 개발 패턴과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

수도권 그린벨트는 수도권 한가운데 위치하고 있음에도 불구하고 그린벨트 경계 안쪽으로 온도가 낮은 것으로 나타나고 있어, 이는 그린벨트의 녹지로 인해 온도가 낮은 것으로 판단된다. 그러나 그린벨트 안쪽으로 해제가 진행 중이거나 해제된 지역을 중심으로 그린벨트 내부의 온도가 높은 것으로 나타났으며, 특히 그린벨트 서

쪽 지역의 경우에는 그린벨트 지역임에도 불구하고 온도가 높게 나타났다.

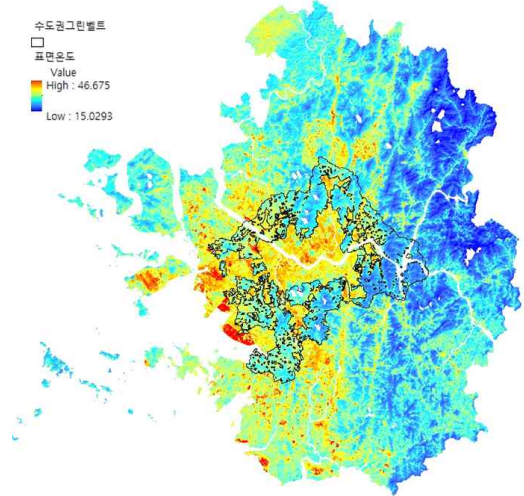


Figure 2. 수도권 표면온도 분포 현황

3.3 식생지수

정규식생지수(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)는 Deardorff(1978)가 식생피복 지수의 개념을 제안하면서 이를 정량적으로 산정하는 연구가 진행되었다. 이렇게 개발된 식생지수는 주로 도시의 열섬 현상과 지표 및 도시 특성과의 관계에 관한 연구에 많이 사용되고 있다.

식생지수는 녹지 분석에 있어 많이 사용하는 지표 중에 하나이며, 식생지수는 단위면적당 식생이 차지하고 있는 면적을 나타내고 있다. 보통 -1 에서 1사이의 값을 갖고 있으며, 숲과 같은 완전한 녹지지역은 1로 표현하며, 사막이나 황무지 같은 지역일 수록 0에 가까워지고, 물이나 얼음, 눈과 같은 지역일수록 -1 값에 가까워지며 이 지역에서는 전혀 식생이 존재하지 않는다. 식생지수를 추출하는 모형은 다음과 같다(지준범 & 최영진, 2014).

$$NDVI = \frac{BAND4 - BAND3}{BAND4 + BAND3}$$

위의 식을 거쳐 ArcGIS 프로그램을 이용하여 Figure 2와 같이 수도권 식생지수를 추출하였다. 추출된 식생지수는 -0.19에서 0.61의 분포를 갖는 것으로 나타났다. 서울을 중심으로 인천, 경기도 서남부 지역과 경부과 중부고속도로 축을 중심으로 식생지수가 낮게 나타났으며, 특히 공장이 밀집되어 있는 서해안의 인천 및 경기 화성지역의 식생지수가 매우 낮은 것으로 나타났

다. 반면 경기도 동부 및 북부지역을 중심으로 대체로 식생지수가 양호하나 스키장 및 골프장 개발로 인해 식생지수가 낮은 지역도 일부 관찰되었다.

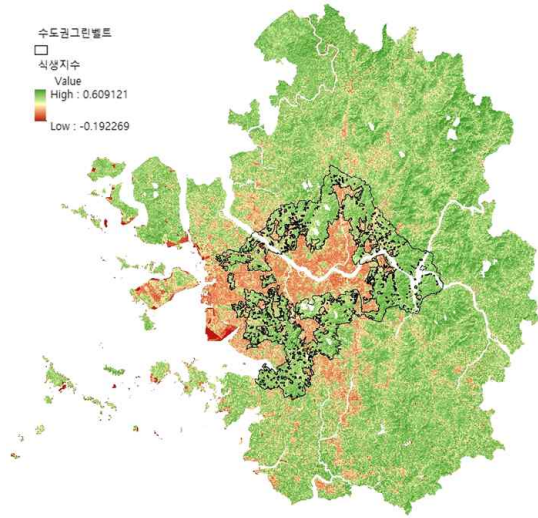


Figure 3. 수도권 식생지수 분포 현황

수도권 내부지역에 비해 그린벨트의 식생은 구역 안쪽으로 식생이 대체로 양호한 것으로 나타나고 있어, 이는 그린벨트가 녹지공간으로서 역할을 하고 있다고 판단된다. 그러나 그린벨트 안쪽으로 해제가 진행 중이거나 중간 중간 해제된 지역을 중심으로 그린벨트 내부의 식생지수가 낮은 것으로 나타났으며, 특히 그린벨트 서쪽 지역의 경우에는 그린벨트 지역임에도 불구하고 식생지수가 낮게 나타났다. 이는 이 지역의 그린벨트 내 녹지가 거의 존재하지 않아 개발의 압력을 계속 받고 있음을 알 수 있으며, 이는 그린벨트가 녹지로서의 역할을 제대로 하지 못하고 있음을 보여준다.

3.3 그린벨트 내 표면온도와 식생지수의 관계

본 절에서 추출한 표면온도와 식생지수 그리고 그린벨트 지역과의 관계는 Figure 3과 같다. 아래의 그림은 그린벨트를 기준으로 그린벨트 안쪽 부분인 서울지역(A), 그린벨트지역(GB), 그린벨트 바깥쪽 부분인 수도권 외곽지역(B)로 구분한 후, 그린벨트를 중심으로 500m 간격으로 ArcGIS 10.2 프로그램을 이용하여 Buffer한 후 각 영역에 대해 평균 온도 및 식생지수를 구하여 그래프와 그림으로 표현한 것이다.

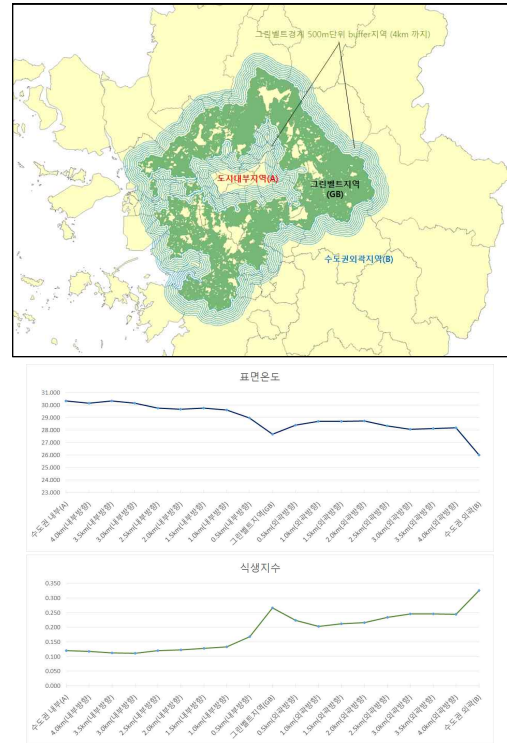


Figure 3. 표면온도·식생지수·그린벨트와의 관계

본 그림에서 알 수 있듯이 표면온도의 경우 도시 내부지역(A)에서 제일 높으며, 그린벨트 방향으로 갈수록 온도는 점점 하락하는 것으로 나타났다. 또한 그린벨트를 벗어나 그린벨트 바깥 지역인 수도권 외곽지역으로 갈수록 온도가 소폭 상승하다가 수도권 외곽지역(B)에서 평균온도가 급격하게 감소한 것을 알 수 있다.

식생지수의 경우는 도시내부지역(A)에서 제일 낮으며, 그린벨트 방향으로 갈수록 식생지수가 점점 증가하는 것으로 나타났다. 그린벨트 지역에서 식생지수가 높게 나타나며, 또한 그린벨트를 벗어나 그린벨트 바깥지역인 수도권 외곽지역으로 갈수록 식생지수가 온도가 소폭 하락하다가 외곽지역(B)에서 식생지수가 높게 유지되고 있음을 알 수 있다. 이는 수도권의 북부, 동부, 남부 지역이 수도권 중서부 지역에 비해 상대적으로 산이나 숲이 많이 있기 때문이라고 판단된다. 도시 온도와 식생의 경우 Figure 3과 같이 식생지수가 높은곳에서 온도가 낮아지고, 식생지수가 낮아진 곳에서 온도가 높아지는 관계를 갖고 있는 것으로 나타났다.

Table 1. 표면온도에 미치는 영향 변수의 설명

종속변수		구분	설명	자료출처
설명 변수	식생요인	식생지수	Landsat-8 위성영상에서 추출한 표면온도의 집계구 평균	U.S.GS Global Visualization Viewer(2014)
	토지 이용요인	주거면적비율	집계구별 주거면적비율	
		상업면적비율	집계구별 상업면적 비율	
		공업면적비율	집계구별 공업면적 비율	
		녹지및오픈스페이스 면적 비율	집계구별 녹지 및 오픈스페이스 면적 비율	
		비도시지역 비율	집계구별 비도시지역 면적 비율	
	인구요인	인구밀도	집계구별 인구 밀도	통계청(2015)
		고용밀도	집계구별 고용 밀도	
	산업요인	제조업체 수	집계구별 제조업체 수	
	교통요인	교차로 개수	집계구별 교차로 개수	국가교통DB 센터(2015)
	대기오염 요인	미세먼지(PM10) 지수	집계구별 미세먼지 지수의 평균	환경부 대기환경정보 (2015)
		오존(O3) 지수	집계구별 오존 지수의 평균	
		일산화탄소(CO) 지수	집계구별 일산화탄소 지수의 평균	
		이산화질소(NO2) 지수	집계구별 이산화질소 지수의 평균	
		아황산가스(SO2) 지수	집계구별 아황산가스 지수의 평균	
	그린벨트 요인	도시내부지역	그린벨트로부터 4km 이상의 도시 내부(서울) 지역데미	KLIS (2016)
		3.5~4km(내부방향)	그린벨트로부터 수도권 내부방향 4km의 거리를 500m 단위로 구분하여 더미처리	
		3~3.5km(내부방향)		
		2.5~3km(내부방향)		
		2~2.5km(내부방향)		
		1.5~2km(내부방향)		
		1~1.5km(내부방향)		
		0.5~1km(내부방향)		
		0~0.5km(내부방향)		
		그린벨트		
0~0.5km(외곽방향)		그린벨트로부터 수도권 외곽방향 4km의 거리를 500m 단위로 구분하여 더미처리		
0.5~1km(외곽방향)				
1~1.5km(외곽방향)				
1.5~2km(외곽방향)				
2~2.5km(외곽방향)				
2.5~3km(외곽방향)				
3~3.5km(외곽방향)				
3.5~4km(외곽방향)				
수도권외곽지역	그린벨트로부터 4km 이상의 수도권 외곽지역 지역데미			

4. 그린벨트가 지표면 온도에 미치는 영향 분석 결과

4.1 변수설명 및 기초통계

본 연구의 종속변수는 3장에서 추출한 수도권 지표면 온도를 사용하였다. 그리고 이에 미치는 다양한 사회·경제적·물리적 요인을 Table 1과 같이 선정하였다.

수도권 지표면 온도에 미치는 영향을 설명하기 위한 설명변수로는 먼저 3장에서 추출한 식생요인을 사용하였고, 도시의 토지이용이 도시 지표온도에 영향을 미칠 것으로 주장하고 있어 변수로 사용되었다. 기존의 연구들은 주로 상업과 공업지역에서 지표의 온도 상승에 영향을 준

다고 주장하였다(Lee et al, 2009; Connors et al, 2013; Mallick et al, 2013). 그 중 Lee et al(2009)의 연구에서는 토지이용 요인 중 주거지에서는 온도가 하락하지만 상업지와 공업지에서는 상승한다고 하였으며, 녹지 지역에서는 하락한다고 분석결과 나타났다. 따라서 한국토지이용정보시스템(KLIS: Korea Land use Information System) 데이터를 이용하여 수도권의 토지이용을 크게 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지 및 오픈스페이스, 하천, 비도시지역으로 구분하여 사용하였다. 도로의 경우 먼 적인 형태보다 선적인 형태로 나타나 그 분석 결과의 영향이 미미할 것으로 판단되어 사용하지 않았다. 녹지 및 오픈스페이스는 그린벨트의 효과를 통제하기 위하여 사용하였으며, 하천 역시 표면온도 저감 효과가 있는 것으로 판단되어 사용하였다. 비도시 지역은 우리나라의 토지이용계획이 도시지역에서 이루

어지기 때문에 위에 해당하지 않는 지역을 비도시 지역으로 선정하였으며, 비도시지역의 경우 위의 표면온도 분포 현황에서 나타났듯이 도시 지역에 비해 임야나 농지, 숲 등을 나타나 있는 것을 알 수 있다.

또한 인구요인으로 인구밀도와 고용밀도를 사용하였다. 인구는 도시를 구성하는 중요한 요소이며 사람들의 활동에 의해 환경이 오염되고 있다. 도시 온도와 관련된 연구에서 인구와 고용이 도시온도 상승에 영향을 미친다고 주장하고 있다(Buyantuyev & wu, 2010; McKittrick & Michaels, 2004; Mallick et al., 2013; Zhang & Wang, 2008).

산업요인은 제조업체에서 발생하는 고온의 열이 대기온도에 영향을 미치는 것으로 판단되어 제조업체 수도 같이 변수로 사용하였으며, 도시 온도 상승의 또 다른 주범으로 자동차에 발생하는 열이 도시 온도의 상승에 영향을 미치므로(Lindberg et al., 2003; Vieria & Vasconcelos., 2003). 사용하였다. 교통요인과 관련된 변수는 도로의 연장, 도로의 면적, 교차로의 개수 등이 있지만 변수 간 상관관계를 고려하여 집계구 내 교차로 개수를 사용하였다. 교차로가 많을수록 교체의 원인이 되며 정차 중 뿜어나오는 열기가 온도에 영향을 줄 것으로 판단하여 사용하였다.

Ai-Serous(2012)는 대기오염과 도시온도는 양(+)의 상관관계가 있다고 주장하였으며, Liu & Shen(2014) 또한 녹지의 변화가 대기오염과 미기후변화에 큰 영향을 주고 있다고 주장하였다. 따라서 우리나라 대표적 다섯 가지 대기오염물질인 미세먼지(PM₁₀), 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂), 일산화탄소(CO)와 오존(O₃)을 지수로 환산하여 변수로 사용하였다. 대기오염을 추정하는 과정은 김희재와 전명진(2014)에서 사용된 데이터와 동일한 과정으로 추출하였다.

마지막으로 수도권 그린벨트가 지표면 온도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Figure 4와 같이 그린벨트 지역 더미변수를 사용하였으며, 그린벨트 경계를 기준으로 500m 간격으로 도시 내부방향과 수도권 외곽방향으로 각각 4km 까지의 범위를 ArcGIS를 이용하여 영향권(Buffer)을 설정하여 더미 처리하였다. 또한 4km 경계에 해당하지 않는 서울 내부지역과 수도권 외곽지역도 더미 처리하여 사용하였다. 이는 그린벨트에 의한 지표온도 저감 효과의 영향 범위를 보고자 함에 있다.

Table 2는 그린벨트가 도시 온도에 미치는 영향에 대한 분석 모형에 사용된 종속 및 설명 변수의 기초 통계량을 나타내고 있다. 종속변수인 표면온도의 경우 2014년 9월의 가장 높은 표면온도를 갖고 있는 집계구는 37.64℃ 이며 가장

낮은 온도를 갖는 집계구는 20.87℃, 수도권 전체 평균 온도는 28.75℃의 분포를 보이고 있다. 식생지수의 경우 집계구별로 -0.27에서 0.47의 분포를 보이며 평균 0.17의 식생지수를 갖고 있는 것으로 나타났다.

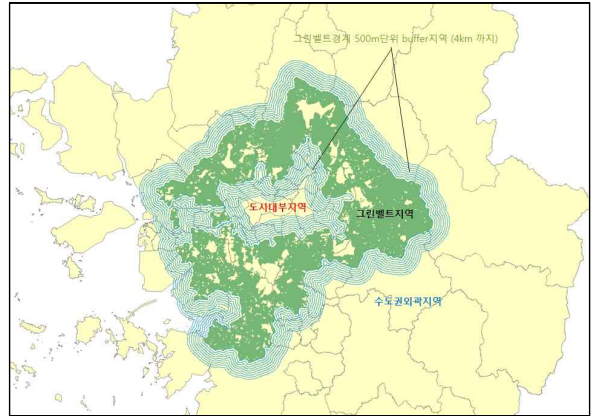


Figure 4. 그린벨트로부터 거리 더미(GB Distance Bands)

토지이용 요인에서 전체 집계구 중 주거 면적이 갖는 비율은 64%인 것으로 나타났으며, 상업지역의 경우 3%, 공업지역은 2%로 각각 나타났다. 녹지 및 오픈스페이스의 면적은 전체 집계구의 11%로 나타났으며 하천은 1%로 나타났다. 또한 비도시지역의 비율은 3%에 해당하는 것으로 나타났다.

인구 요인은 인구 밀도의 경우 평균 43926.49 인/km², 고용 밀도는 4634.43 인/km²으로 나타났으며, 산업 요인의 집계구별 제조업체 수는 집계구별로 제조업체가 없는 집계구에서 1,721개를 갖고 있는 집계구가 있는 것으로 나타났으며 집계구 평균 3.88개로 제조업체 위치의 지역적 편차가 큰 것으로 나타났다. 교통요인으로 사용된 교차로 개수의 경우도 최대 103개의 교차로를 갖고 있는 집계구가 있는 것으로 나타났다.

대기오염의 경우 미세먼지(PM₁₀)는 평균 263.13ppm으로 가장 높은 오염 수준을 나타내고 있는 반면, 아황산가스(SO₂)가 평균 31.80으로 가장 낮은 수치를 갖고 있다.

그린벨트의 경우 수도권 집계구의 약 20%에 해당하며 그린벨트로부터 4km 이내지역에 해당하지 않는 수도권 내부 지역은 집계구의 약 2%, 수도권 외곽지역은 약 20%에 해당하는 것으로 나타났다.

4.2 분석모형 및 결과

그린벨트와 도시의 특성이 도시표면온도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다중회귀분석

Table 2. 기초통계분석

구분		N	평균 (Mean)	표준편차 (Standard deviation)	최소값 (Min)	최대값 (Max)
종속변수	표면온도	42558	28.75	1.78	20.87	37.64
식생요인	식생지수	42558	0.17	0.08	-0.12	0.47
토지 이용요인	주거면적비율	42558	0.64	0.33	0	1
	상업면적비율	42558	0.03	0.12	0	1
	공업면적비율	42558	0.02	0.14	0	1
	녹지 및 오픈스페이스 면적 비율	42558	0.11	0.24	0	1
	하천면적 비율	42558	0.01	0.07	0	1
인구요인	비도시지역 비율	42558	0.03	0.17	0	1
	인구밀도(인/km ²)	42558	43926.62	41866.41	1.00E-21	3521478.33
	고용밀도(인/km ²)	42558	4634.35	11274.17	1.00E-21	1218780.24
산업요인	제조업체 수	42558	3.88	29.09	0	1721
교통요인	교차로 개수	42558	0.62	2.37	0	103
대기오염요인	미세먼지(PM10)지수	42558	263.13	35.37	104.49	372.62
	오존(O3)지수	42558	74.69	11.75	31.80	123.30
	일산화탄소(CO)지수	42558	44.72	8.31	19.21	57.96
	이산화질소(NO2)지수	42558	108.18	9.93	48.56	158.03
	아황산가스(SO2)지수	42558	31.80	7.34	12.62	84.27
그린벨트 더미	도시내부지역	42558	0.02	0.15	0	1
	3.5~4km(내부방향)	42558	0.02	0.15	0	1
	3~3.5km(내부방향)	42558	0.03	0.17	0	1
	2.5~3km(내부방향)	42558	0.03	0.18	0	1
	2~2.5km(내부방향)	42558	0.04	0.19	0	1
	1.5~2km(내부방향)	42558	0.04	0.20	0	1
	1~1.5km(내부방향)	42558	0.05	0.22	0	1
	0.5~1km(내부방향)	42558	0.06	0.23	0	1
	0~0.5km(내부방향)	42558	0.06	0.23	0	1
	그린벨트	42558	0.20	0.40	0	1
	0~0.5km(외곽방향)	42558	0.05	0.22	0	1
	0.5~1km(외곽방향)	42558	0.05	0.21	0	1
	1~1.5km(외곽방향)	42558	0.04	0.20	0	1
	1.5~2km(외곽방향)	42558	0.03	0.18	0	1
	2~2.5km(외곽방향)	42558	0.02	0.15	0	1
	2.5~3km(외곽방향)	42558	0.02	0.13	0	1
	3~3.5km(외곽방향)	42558	0.02	0.13	0	1
	3.5~4km(외곽방향)	42558	0.02	0.12	0	1
	수도권외곽지역	42558	0.20	0.40	0	1

(Multiple Regression Analysis)을 이용하여 분석하였다. 모형에서 사용된 변수는 다중회귀분석에서 가장 많이 사용하고 있는 단계적(Stepwise) 회귀분석 방법을 사용하였다. 이 방법은 변수 간에서 발생하는 다중공선성(Multicollinearity) 문제를 해결할 수 있는 장점이 있어 기존의 도시의 특성 및 녹지공간과 표면 온도의 관계를 다루는 연구에서 대부분 사용되었다. 본 연구의 사용된 모형은 다음의 식과 같다.

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + e$$

여기서 Y_i 는 종속변수인 표면온도, α 는 상수항, β 는 수도권 식생요인, 토지이용요인, 인구요인, 산업 요인, 교통 요인, 대기오염 요인, 그린벨트 요인의 계수 벡터를 뜻한다. X_i 는 설명변수 각 요인에 대한 변수 행렬이며 e 는 오차

항을 의미한다. 본 연구에서는 표면온도에 자연 로그를 취한 값을 종속변수로 사용하였다. 이는 분석결과에서 변수 단위의 변화 대비 표면온도의 변화율을 보기 위함이다.

Table 3은 표면 온도에 대한 회귀분석 결과를 제시하고 있다. 본 모형의 설명력은 0.58로 분석되어 독립변수들에 대한 본 모형의 설명력이 약 58%임을 알 수 있다.

본 연구에서는 그린벨트의 녹지에 대한 효과를 최대한 통제하기 위하여 식생지수를 사용하였다. 또한 녹지 및 오픈스페이스 비율과 비도시 지역 면적의 비율을 변수로 사용하였다. 식생요인의 경우 분석결과 식생지수는 통계적으로 유의미한 부(-)의 관계로 식생지수가 한 단위 상승할 때 마다 온도가 4.9% 만큼 낮아지는 효과가 있어 식생이 표면온도에 상당한 영향을 미치는

Table 3. 지표면온도에 미치는 영향 분석 결과

구분		LST: Land Surface Temperature			
		β	t-value	VIF	
Intercept		3.434	754.05 ***	0.000	
식생요인	식생지수	-0.493	-170.51 ***	1.541	
토지 이용요인	주거지역 면적비율	-0.018	-12.77 ***	5.915	
	상업지역 면적비율	-0.025	-10.63 ***	1.934	
	공업지역 면적비율	0.010	5.18 ***	1.731	
	녹지 및 오픈스페이스 면적 비율	-0.033	-21.2 ***	3.546	
	하천면적 비율	-0.014	-4.38 ***	1.269	
인구요인	비도시지역 비율	-0.047	-25.54 ***	2.421	
	인구밀도(인/km ²)	-0.00005	-1.37	1.114	
산업요인	고용밀도(인/km ²)	0.0001	15.18 ***	1.228	
	제조업체 수	0.0003	30.43 ***	1.325	
교통요인	교차로 개수	0.001	8.53 ***	1.117	
대기오염요인	미세먼지(PM10)지수	0.00005	8.06 ***	1.143	
	오존(O3)지수	0.00007	3.86 ***	1.322	
	일산화탄소(CO)지수	-0.00006	-1.87	1.685	
	이산화질소(NO2)지수	0.0001	2.5	2.080	
	아황산가스(SO2)지수	0.001	22.03 ***	1.303	
그린벨트 요인*	3.5~4km(내부방향)	0.002	1.1	1.915	
	3~3.5km(내부방향)	-0.003	-1.98	2.166	
	2.5~3km(내부방향)	-0.006	-3.8 ***	2.339	
	2~2.5km(내부방향)	-0.009	-5.6 ***	2.577	
	1.5~2km(내부방향)	-0.010	-5.89 ***	2.640	
	1~1.5km(내부방향)	-0.011	-6.95 ***	2.994	
	0.5~1km(내부방향)	-0.015	-9.63 ***	3.301	
	0~0.5km(내부방향)	-0.019	-12.27 ***	3.378	
	그린벨트	-0.010	-7.07 ***	8.302	
	0~0.5km(외곽방향)	-0.004	-2.6 **	3.127	
	0.5~1km(외곽방향)	-0.010	-6.34 ***	2.918	
	1~1.5km(외곽방향)	-0.007	-4.05 ***	2.680	
	1.5~2km(외곽방향)	-0.007	-4.28 ***	2.459	
	2~2.5km(외곽방향)	-0.007	-3.79 ***	1.980	
	2.5~3km(외곽방향)	-0.009	-4.54 ***	1.729	
	3~3.5km(외곽방향)	-0.014	-6.96 ***	1.750	
	3.5~4km(외곽방향)	-0.015	-7.38 ***	1.680	
	수도권 외곽지역	-0.016	-11.27 ***	8.147	
	R-Square		0.5826		
	Adj R-Square		0.5823		

*참조변수: 도시내부지역, **p<0.05, ***p<0.001

것으로 나타났다.

토지이용요인의 경우 집계구내 주거지역 면적 비율이 통계적으로 유의미한 부(-)의 관계를 갖고 있으며 주거지역 면적이 1% 증가할수록 온도는 1.8% 낮은 것으로 나타났으며 상업지역 면적비율 역시 주거지역과 마찬가지로 1% 증가할수록 온도는 2.5% 낮은 통계적으로 유의미한 부(-)의 관계를 갖고 있는 것으로 나타났다. 공업지역의 경우 면적 비율이 높은 지역에서 표면온도와 통계적으로 유의미한 정(+)의 관계를 갖고 있어 집계구내 공업지역 면적이 1% 증가할수록 온도는 1% 낮아지는 것으로 나타났다. 녹지 및 오픈스페이스와 하천 지역의 경우 모두 통계적으로 유의미한 부(-)의 관계를 갖고 있어 녹지 및 오픈스페이스와 하천지역의 면적이 1% 증가할수록

각각 1.4%, 4.7%의 온도가 낮아지는 효과를 갖고 있는 것으로 분석되었다.

인구요인의 경우 고용밀도가 높은 지역에서 통계적으로 유의미한 정(+)의 관계를 갖고 인구밀도의 경우 통계적으로 무의미한 결과로 분석되었다. 고용밀도가 1단위 늘어날수록 온도는 0.01% 상승하는 것으로 분석되었다.

산업 요인의 경우 선행연구에서의 분석결과 같이 제조업체 수가 지표온도 상승에 통계적 유의미성을 갖고 정(+)의 관계를 갖고 있는 것으로 나타나 왔다. 이는 제조업체에서 제품 생산에서 발생하는 고온 때문일 것으로 판단된다. 집계구내 제조업체가 한 업체 늘어날수록 온도는 0.03% 상승하는 것으로 나타났다.

교통 요인의 경우 예상한 것과 같이 교차로수

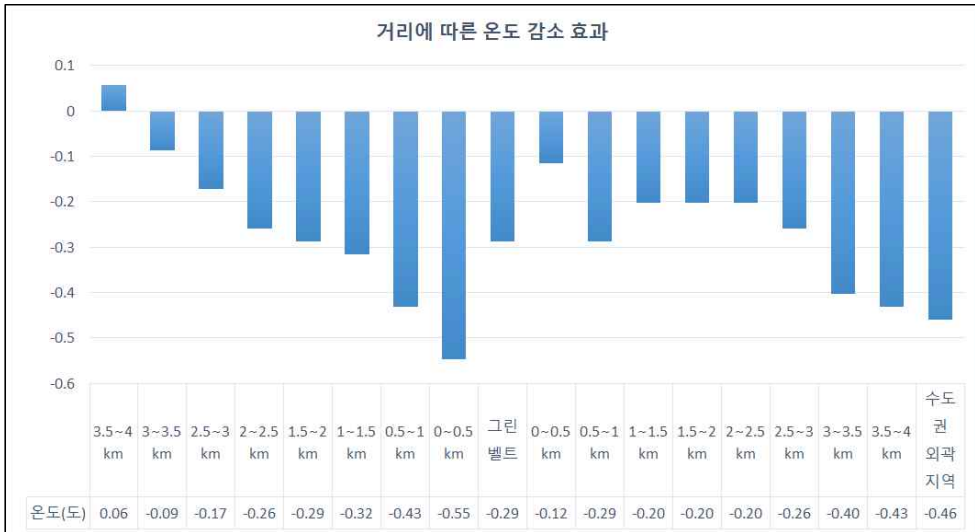


Figure 5. 그린벨트 거리(GB Distance band)에 따른 온도 감소 효과

와 표면온도는 통계적으로 유의미한 정(+)의 관계를 갖고 있어 교차로의 차량 대기가 온도상승에 영향을 미치며 교차로수가 많은 지역에서 지표온도가 상승하는 것으로 분석 되었다. 집계구 내 교차로가 1개 늘어날수록 지표온도는 0.1% 상승하는 것으로 나타났다.

대기오염 요인의 경우 미세먼지(PM₁₀)와 오존(O₃), 아황산가스(SO₂)가 통계적인 유의성을 갖고 정(+)의 관계를 갖고 있어 이들 대기오염 물질의 농도가 높은 지역에서 지표온도가 상승하는 것으로 나타났다. 그러나 일산화탄소(CO)와 이산화질소(NO₂)의 경우 통계적으로 무의미하게 나타나 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 미세먼지(PM₁₀)와 오존(O₃), 아황산가스(SO₂)물질이 한 단위 증가할 때마다 지표온도는 각각 0.005%, 0.007%, 0.1% 높은 것을 알 수 있다.

마지막으로 본 연구의 관심사인 그린벨트 지역에서는 통계적으로 유의성을 갖고 부(-)의 관계를 갖고 있어 그린벨트 지역에서 표면온도가 1% 감소하는 효과가 있는 것으로 나타났다. 특히 그린벨트를 중심으로 도시의 내부와 외부의 온도감소효과를 알아보기 위한 거리 더미 변수(Distance band)별 분석 결과 그린벨트에서 수도권 내부방향의 경우 경계로부터 3km 까지 통계적 유의성을 갖는 부(-)의 관계를 갖고 있어 참조변수로 설정된 도시내부에 비해 약 0.6%에서 1.9%의 온도 감소효과가 나타나는 것으로 분석 되었다. 그러나 3km 이후로는 통계적으로 무의미하게 나타나 감소가 나타나지 않는 것으로 분석되어 수도권 내부방향으로는 그린벨트에 의한 온도감소가 약 3km 정도까지 있는 것으로 나타났다. 또한 수도권 외곽방향의 경우도 온도감소

가 있는 것으로 나타났다. 수도권 외곽지역 방향으로는 0.7%에서 1.5%의 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 그린벨트로부터 4km 거리 이상인 수도권 외곽지역에서는 수도권 내부지역에 1.6% 온도가 감소하는 것으로 나타났다.

Figure 5는 위에서 분석한 결과를 수도권 평균 온도를 이용하여 거리별 온도 감소를 표현하였다. 그린벨트 지역에서는 약 0.29°C의 감소효과를 보이고 있으며, 그린벨트 경계에서 수도권 내부방향으로 갈수록 500m 단위로 0.55°C, 0.43°C, 0.32°C, 0.29°C, 0.17°C, 0.09°C로 각각 감소를 보이다가 그린벨트로부터 수도권 내부방향으로 3.5km 부터는 그린벨트에 의한 감소가 나타나지 않고 오히려 0.06°C 상승하는 것을 알 수 있었다. 수도권 외곽지역 방향으로는 4km 까지 0.12°C에서 0.43°C의 감소하다가 4km를 벗어난 지점에서는 0.46°C 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 수도권의 그린벨트의 환경적 효과를 분석하기 위해 그린벨트가 지표면 온도에 미치는 영향을 실증적으로 분석 하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 그린벨트와 지속가능한 도시에 대한 이론과 선행연구를 검토하였고, 다중회귀분석(Multiple Regression)모형을 이용하여 그린벨트가 도시의 지표면 온도에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 분석에 사용된 주요자료는 LANDSAT 8-OLI 위성영상 이미지데이터, 한국토지이용정보시스템(KLIS), 대기오염 데이터, 수도권 집계구 데이터 등이 본 분석에 사용되었다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다. .

첫째, 식생지수가 높은 지역에서는 표면온도

가 낮아지는 것으로 나타나 식생에 따른 표면온도 저감효과가 있는 것으로 분석되어 식생이 표면온도 감소에 중요한 변수임을 확인할 수 있었다.

둘째, 토지이용 요인 중 주거지의 비율은 통계적 유의성을 갖고 부(-)의 영향력을 갖고 있는 것으로 분석되어 주거지역에서는 표면 온도의 낮은 것으로 나타났다. 이는 타 토지 용도지역에 비해 주거지역에 산재되어 있는 공원이나 오픈스페이스의 영향이 클 것으로 판단된다. 상업면적이 경우에도 기존 외국의 선행연구에서는 도시온도의 상승에 기여한다고 하지만 본 분석의 결과는 반대로 감소하는 것으로 나타났다. 이 역시 최근 상업지역의 오픈스페이스 확보, 옥상녹화 사업, 분수대 설치 등에 따른 결과로 판단된다. 공업용지의 경우 제조업체가 상대적으로 많고 열을 발생시키는 작업이 많아 이 지역은 표면온도 상승에 기여하는 것으로 나타났다. 또한 녹지 및 오픈스페이스, 하천지역의 경우 선행연구의 결과처럼 표면온도 감소에 통계적 유의성을 갖고 기여하는 것으로 나타났다.

셋째, 인구 요인 중 고용밀도는 표면온도를 증가시키는 원인으로 나타나 고용밀도가 높은 지역에서 도시의 온도상승의 원인이 있는 것으로 나타났다. 그러나 인구밀도의 경우 통계적 유의성이 없어 온도의 상승과는 관련이 없는 것으로 나타났다.

넷째, 산업요인으로 사용된 제조업체 수와 교통요인으로 사용된 교차로의 개수는 모두 통계적인 유의성을 갖고 정(+)의 관계를 나타나고 있어 이들의 변수는 도시 표면온도 상승에 기여하는 것으로 나타났다.

다섯째, 대기오염 요인으로 사용된 다섯 가지 오염물질 중 미세먼지(PM₁₀), 오존(O₃), 이산화질소(NO₂)의 농도는 모두 표면온도 상승에 기여하는 것으로 나타났다. 그러나 일산화탄소(CO)와 이산화질소(NO₂)의 경우 지표온도 상승에 직접적으로 연관이 없는 것으로 분석되었다.

마지막으로 그린벨트 요인은 그린벨트 지역에서 온도감소 효과가 있는 것으로 나타났으며, 그린벨트 지역 뿐만 아니라 그 주변지역인 약 3km 까지 온도 감소 효과를 갖고 있는 것으로 나타나 그린벨트가 도시의 표면온도를 감소시키는 효과가 확인되었다.

그린벨트가 표면온도에 미치는 영향에 대한 분석 결과는 도시의 개발과 그린벨트의 녹지보전 정책 입안 및 집행 시 다음과 같은 시사점을 제시할 수 있다. 첫째, 본 연구의 분석결과는 그린벨트 및 도시의 특성이 표면온도에 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 최근 사회적으로 이슈되고 있는 도시 열섬화 현상(UHI: Urban Heat

Island)의 원인과 분석결과가 대체로 일치하는 것으로 나타났다. 지표의 온도가 1°C만 상승하여도 지구 온난화에 심각한 영향을 준다고 알려져 있다. 따라서 도시를 새로 건설하거나 재개발 할 때에는 표면온도의 저감효과를 위한 환경 정책도 같이 반영되어야 하며, 기존의 도시들도 도시온도 저감을 위한 정책을 펼칠 필요가 있다. 둘째, 본 연구의 분석 결과로 제시된 식생지수가 높은 지역에서는 도시의 표면온도가 내려가며, 고용밀도가 높은 서울 및 주변지역, 교차로 인접지역, 제조업체 밀집지역 및 공업지역 등에서 도시의 표면온도가 높은 것으로 분석되어, 도시의 표면온도를 낮추기 위해 표면온도가 높은 지역적 특성을 파악하여 온도 저감효과가 높은 녹지나 오픈스페이스, 인공 하천의 설치 등으로 식생지수를 높일 수 있는 환경 정책이 입안되어야 한다. 특히 공업지역과 도로변을 중심으로 녹지의 양을 늘리고 앞으로 새로 개발될 도시에는 녹지 및 오픈스페이스의 비중을 보다 늘려 도시의 온도를 낮추는 정책에 힘써야 할 것이다. 셋째, 대기오염 물질의 경우 미세먼지(PM₁₀), 오존(O₃), 아황산가스(SO₂)가 도시 표면온도 증가에 기여하는 것으로 나타났다. 이 오염물질은 모두 자동차 및 공장에서 주로 발생하는 오염물질임에 따라, 대기 환경을 위한 대기오염물질 저감뿐만 아니라 도시의 온도를 낮추기 위해서도 위의 오염물질에 대한 규제정책이 필요하다고 판단된다. 넷째, 그린벨트 지역과 그 인근지역에서 온도 저감에 효과가 있는 것이 실증적으로 검증되었다. 최근 수도권 그린벨트 경계를 중심으로 대규모 임대주택 건설 등으로 인해 주거지가 들어서고 있다. 이렇게 점점 그린벨트의 경계지역이 개발되기 시작하면 그린벨트 안쪽까지 녹지가 훼손될 가능성이 있다. 따라서 그린벨트의 환경적 혜택을 받기 위해, 불가피하게 공익적 목적의 사업을 실시하게 될 경우 녹지로서의 가치가 떨어지거나 환경적으로 손상을 많이 입은 지역을 우선적으로 실시하여 대규모 녹지공간으로서 그린벨트가 유지되는 정책적 대안을 마련해야 할 것이다.

본 연구는 수도권 그린벨트의 다양한 환경적 효과 중 지표면 온도 감소 측면에서 수행되었다. 향후 그린벨트가 갖는 대기오염 저감효과를 비롯한 그린벨트가 주는 다양한 환경적 효과에 대한 연구가 필요하다. 뿐만아니라 그린벨트의 환경적 효과를 경제적 측면에서 분석하는 연구가 추가로 진행될 예정이다.

REFERENCES

- 국토해양부. (2011). 개발제한구역 40 년: 1971-2011. 한국토지주택공사 토지연구원
- 권용우, 변병설, 이재준 & 박지희. (2013). 그린 벨트: 개발제한구역 연구, 박영사
- 김재익, 하성규, 전명진, 문태훈, H.Richardson & 배창희. (2004). 도시성장관리-정책과 수단. 형설출판사.
- 김희재 & 전명진. (2014). 도시 특성과 대기 오염 수준과의 관계 분석 연구: 수도권을 사례로. 국토계획. 49(7): 151-167.
- 안건혁 & 온영태. (1997). 1960년 이래 서울의 도시성장정책에 관한 비판. 국토계획. 32(3): 281-301
- 전명진. (2001). 수도권 개발제한구역이 도시 교통 및 자동차대기오염에 미친 영향분석. 국토계획. 36(2): 241-253.
- 지준범 & 최영진. (2014). 수도권 지표특성 분석을 위한 Landsat 자료의 활용. 한국지구과학회지. 35(1): 54-68.
- 최막중. (1994). 그린벨트가 서울대도시지역 지가에 미치는 영향에 관한 실증분석. 대한국토계획학회지 72: 97-111.
- 하성규 & 김재익. (2008). 현대 도시관리론: 이론과 현실, 형설출판사.
- Akbari, H.S., & Konopacki, S., (2004). Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. Energy Policy, in press.
- Al-Seroury, F. A. (2012). Temporal Changes of Air Pollutants and Land Surface Temperature around Jeddah Desalination Power Plant, KSA. Journal of American Science. 8(2): 503-508.
- Bae, C., & M. J. Jun. (2003). Counterfactual planning: what if there had been no greenbelt in Seoul?. Journal of Planning Education and Research. 22(4): 374-383.
- Bengston, D. & Youn, Y-C. (2006). Urban Containment Policies and the Protection of Natural Areas: The Case of Seoul's Greenbelt. Ecology and society. 11(1): 3.
- Black, J. Thomas, & James Hoben.(1985). Land Price Inflation. Urban Geography, 6(1): 27-49.
- Buyantuyev, A., & Wu, J. (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.
- Cho, C. J. (2002). The Korean growth-management programs: Issues, problems, and possible reforms. Land Use Policy. 19: 13-27.
- Connors, J.P, Galletti, C.S, Chow, WTL. (2013). Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona. Landscape ecology. 28: 271-283
- Correll, M. R., Lillydahl, J. H. & Singell, L. D. (1978). The effects of greenbelts on residential property values: Some findings on the political economy of open space. Land Economics, 54(2): 207-217.
- Crompton, J.L. (2001). The Impact of Parks on Property Values: A Review of the Empirical Evidence, Journal of Leisure Research. 33(1): 1-31.
- Daily, G. C., & K. Ellison. (2002). The new economy of nature: the quest to make conservation profitable. Island Press/Shearwater Books, Washington, D.C., USA.
- Deardorff, J.W. (1978). Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture, With Inclusion of a Layer of Vegetation, Journal of Geophysical Research. 83(4): 1899-1903.
- Fan, Chao., Soe W. Myint & Baojuan Zheng. (2015) Measuring the spatial arrangement of urban vegetation and its impacts on seasonal surface temperatures. Progress in Physical Geography. 39(2): 199-219.
- Faushold, C. J. & R. J. Lilieholm (1999). The Economic Value of Open Space: A Review and Synthesis. Environmental Management. 23(3): 307-320.
- Glaeser, E., & Gyourko, J. (2003). The impacts of building restrictions on housing affordability. Economic Policy Review. 9(2): 21-39.
- Hannah L, Kim, K.H., & Mills, E.S. (1993). Land use controls and housing prices in Korea. Urban Studies 30(1): 147-156.
- Harvey, Jack. (1996). Urban Land Economics 4th ed., Macmillan.
- Heinl, Michael. Albin Hammerle, Ulrike

- Tappeiner & Georg Leitinger. (2015). Determinants of urban-rural land surface temperature differences - A landscape scale perspective. *Landscape and Urban Planning*, 134: 33-42.
- Jun, M. J. & C.-H.C. Bae. (2000). Estimating the commuting costs of Seoul's Greenbelt. *International Regional Science Review*, 23: 300-315.
- Jun, M. J. & Hur, J. W. (2001). Commuting costs of "leap-frog" newtown development in Seoul. *Cities*, 18(3): 151-158.
- Jun, M. J. (2012). The effects of Seoul's greenbelt on the spatial distribution of population and employment, and on the real estate market. *Annals of Regional Science*, 49(3): 619-642.
- Kelly, E.D., (1993). *Managing Community Growth: Policies, Techniques, and Impacts*. Praeger, Westport, CT.
- Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1999a). Major accidents in process industries and an analysis of their causes and consequences. *Journal of Loss Prevention in Process Industries*, 12: 361-378.
- Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1999b). The worst chemical industry accident of 1990s -what happened and what might have been: A quantitative study. *Process Safety Progress*, 18: 135-145.
- Kim, K. H. (1993). Housing prices, affordability, and government policy in Korea. *Journal of Real Estate Finance and Economics*, 6: 55-71
- Klok, Lisette., Sander Zwart, Henk Verhagen, & Elena Mauri. (2012). The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, 64: 23-29.
- Knaap, G.(1985). The price effects of urban growth boundaries in metropolitan Portland, Oregon. *Land Economics*, 61: 26-35.
- Lee, C. M. & Fujita M. (1997). Efficient configuration of a greenbelt: theoretical modelling of greenbelt amenity. *Environment and Planning A*, 29: 1999-2017.
- Lee, C. M. & Linneman P. (1998). Dynamics of the greenbelt amenity effect on the land market: the case of Seoul's greenbelt. *Real Estate Economics*, 26(1): 107-129.
- Lee, C. M. (1999). An intertemporal efficiency test of a greenbelt: Assessing the economic impacts of Seoul's greenbelt. *Journal of Planning Education and Research*, 19(1): 41-52.
- Lee, S.-H. Lee, K.-S. Jin, W.-C. & Song, H.-K. (2009). Effect of an urban park on air temperature differences in a central business district area. *Landscape and Ecological*, 5: 183-191.
- Li X, Zhou W, Ouyang Z, Xu W & Zheng H. (2012). Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China. *Landscape Ecology*, 27: 887-898.
- Li, Peng., Luguang Jiang & Zhiming Feng. (2014). Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. *Remote Sensing*, 6: 310-329.
- Lindberg F, Eliasson I & Holmer B. (2003). Urban geometry and temperature variations. In: Klysik K, Oke TR, Fortuniak K, Grimmond CSB, Wibig J (eds) *Proc 5th Int Conf on Urban Climate*, Vol 1. University of Lodz, Lodz: 205-208.
- Liu, Hsiao-Lan & Yu-Sheng Shen. (2014). The Impact of Green Space Changes on Air Pollution and Microclimates: A Case Study of the Taipei Metropolitan Area. *Sustainability*, 6: 8827-8855.
- Mallick, Javed., Atiqur Rahman & Chander Kumar Singh. (2013). Modeling urban heat islands in heterogeneous land surface and its correlation with impervious surface area by using night-time ASTER satellite data in highly urbanizing city, Delhi-India. *Advances in Space Research*, 52: 639-655.
- McKittrick, Ross. & Patrick J. Michaels. (2004). A test of corrections for extraneous signals in gridded surface temperature data. *Climate Research*, 26: 159-173.
- Nelson, A. C. (1985). A unifying overview of greenbelt influences on regional land values growth and change. *Journal of the American Planning Association*, 16(2): 43-48.
- Nelson, A. C. (1986). Using land markets to evaluate urban containment programs. *Journal of the American Planning Association*, 52(2): 156-171.
- Nelson, A. C. (1988). An empirical note on how

- regional urban containment policy influences an interaction between greenbelt and exurban land markets. *Journal of the American Planning Association*. 54: 178-184.
- Nelson, A.C., & Duncan, J.B., (1995). *Growth Management Principles and Practices*. Planners Press, American Planning Association, Chicago, IL.
- Nicholls, S., & Compton, J. (2005). The impact of greenways on property values: evidence from Austin, Texas. *Journal of Leisure Research*. 37: 321-341.
- Oliveira, Sandra, Henrique Andrade & Teresa Vaz. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment*. 46: 2186-2194
- Segal, David, & Philip Srinivasan. (1985). The Impact of Suburban Growth Restrictions on U.S. Housing Price Inflation, 1975-78. *Urban Geography*. 6: 14-26.
- Son, J. Y. & Kim, K. H. (1998) Analysis of urban land shortages: the case of Korean cities. *Journal of Urban Economics*. 43(3): 362-384.
- U.S.GS. (2015). *Landsat8(L8) data user handbook version1.0*. Department of the Interior U.S. Geological Survey. LSDS-1574
- Vieira H, & Vasconcelos J. (2003). Urban morphology characterisation to include in a GIS for climatic purposes in Lisbon. Discussion of two different methods. In: Klysik K, Oke TR, Fortuniak K, Grimmond CSB, Wibig J (eds) *Proc 5th Int Conf on Urban Climate*, Vol 2. University of Lodz, Lodz: 417-420.
- Yokohari, M., K. Takeuchi, T. Watanabe, & S. Yokota. (2000). Beyond greenbelts and zoning: a new planning concept for the environment of Asian mega-cities. *Landscape and Urban Planning*. 47: 159-171.
- Yokohari, M., R. D. Brown, & K. Takeuchi. (1994). A framework for the conservation of rural ecological landscapes in the urban fringe area in Japan. *Landscape and Urban Planning* .29(2-3): 103-116.
- Zhang, Jinqu & Yunpeng Wang. (2008). Study of the Relationships between the Spatial Extent of Surface Urban Heat Islands and Urban Characteristic Factors Based on Landsat ETM+. *Data Sensors*. 8: 7453-7468.
- Zhu, Zhe., Curtis E. Woodcock & Pontus Olofsson. (2012). Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 122: 75-91.

논문투고일 2020년 05월 21일

논문심사일 2020년 06월 12일

논문게재일 2020년 06월 30일