

연구논문

위성영상을 통한 서울시 지표온도 분석

정 종 철

남서울대학교 GIS공학과

(2012년 10월 18일 접수, 2012년 12월 19일 승인)

The Land Surface Temperature Analysis of Seoul city using Satellite Image

Jong-chul Jeong

Dept. of GIS Namseoul University

(Manuscript received 18 October 2012; accepted 19 December 2012)

Abstract

The propose of this study is to analyze the optimum spatial resolution of the urban spatial thermal environment structure and to evaluate of the possibility detection using aerial photographs and thermal satellite images. The proper techniques of the optimum spatial resolution for the urban spatial thermal environment structure were analyzed. Thermal infrared satellite image of Seoul city were used for the change rate of surface temperature variation and suggested to the spatial extent and effects of urban surface characteristics and spatial data was interpreted as regions. To extract the surface temperature, Landsat thermal infrared satellite image compared with an automatic weather station data and in the field of the measured temperature and surface temperature by thermal environment affects, the spatial domain has been verified. The surface temperature of the satellite images to extract after adjusting surface temperature isotherms were constructed. The changes in surface temperature from 2008 to 2012 the average surface temperature observation images of changing areas were divided into space. The results of this study are as follows: Through analysis of satellite imagery, Seoul city surface temperature change due to extraction comfort indices were classified into four grades. The comfort index indicative of the temperature of Gangnam-gu, 23.7 ~ 27.2 (C°) range and Songpa-gu, a 22.7 ~ 30.6 (C°) respectively, the surface temperature of Yeouido 25.8 ~ 32.6 (C°) were in the range.

Keywords : Land Surface Temperature, Thermal infrared satellite image, optimum spatial resolution, Land cover

1. 서론

우리나라는 급속한 도시개발과 산업화에 의해 도시환경이 급격히 변화되었다. 특히 서울시의 경우 도시 내부 녹지공간의 확보와 생태자원의 보전에 대한 많은 예산을 투자하고 있지만 도시공간은 불투수층의 아스팔트와 콘크리트로 피복되어 도시의 열 환경에 대해 구조적으로 취약한 공간 분포를 가지고 있다. 특히 도시 내의 빌딩과 아파트의 밀집도는 미기후적 특성으로 도시 내부의 온도 증가에 기여하고 있어서 기후변화에 따른 열대야와 폭염에 매우 취약한 공간적 특성을 가지고 있다(노재식, 1973; 박경훈 외, 1999; 정종철, 2009).

급격한 도시화는 양호한 자연생태계를 훼손하고 있으며, 도시화가 진행되는 과정에서 발생하는 토지이용변화에 따른 녹지감소는 태양복사열에 의한 열수지 체계를 변화시키는 근본적인 요인으로 작용하여 이전과는 다른 도시기후가 발생하게 된다고 김수봉 등(2001)은 보고하였다. 특히, 도시화 과정에서 나타나는 가장 뚜렷한 도시기후의 변화는 기온 상승에 의한 열대야와 폭염에 의한 야외 활동의 제한으로 도시생활의 만족도를 저하시키고 있다. 특히 열대야와 폭염은 노약자의 건강 피해에 영향을 미치는 핵심적 요소이며, 기후변화에 따라 대도시의 폭염에 의한 사망률이 증가할 것으로 예측되고 있다.

서울시의 도시 개발과 도로교통망의 성장이 서울시의 도시기온 상승에 크게 기여해왔다는 사실은 도시 기온변화 관측에서 뚜렷한 현상으로 나타나고 있다(김학열, 2003). 도시의 성장과 도시 열 환경의 문제를 공간적으로 연구한 사례는 도시녹지 공간의 중요성(김경환 등, 2000; 박경훈 등, 1999; 백상훈 등, 2009; 박인환 등, 2005)을 제시하는 연구가 많은데, 이광호 등(2002)은 전주시의 성장에 따른 도시 내부 열 환경에 대한 공간적 변화를 분석하고 도시 성장의 공간적 특성이 도시 열 환경에 매우 치명적인 영향을 미치고 있음을 제시하였고, 정종철(2009)은 열 적외 복사특성을 이용하여 위성영상 자료에 의한 도시열섬효과와 도시 내부의 열 환경 밀도 등을 분석하는 연구를 수행하여 전주시의

1984년부터 2005년까지 연도별 월평균 기온, 일조 시간, 강우량 자료 등의 기상관측 자료를 일 자료와 월 평균자료 단위로 위성자료와 비교 분석하였다. 또한, 김현옥 등(2012)은 도시지역의 토지피복유형이 지표면 온도에 미치는 영향을 일산 신도시를 중심으로 연구하여 토지피복과 기온변화의 연구를 수행하였고, 이강국 등(2008)은 대구광역시를 대상으로 열 환경 분포 특성을 분석하여 토지이용에 따른 온도 분포의 지역적 차이를 도심내의 녹지 및 수변 지역과 도심지역간에 온도 차이로 설명하였다.

이러한 선행연구는 기온 자동관측장비와 이동관측장비에(윤일희 등, 1994) 의해 시-공간적인 기온의 변화를 관측함으로써 도시의 장-단기적인 기온 변화의 경향을 분석하고 있으며, 지리정보와(송영배, 2004; 권영아, 2002; 기경석 등, 2009) 위성영상을 이용하여(이현영 등, 1989; 이용식, 1990) 도시 지표 열 분석과 토지이용변화에 따른 기온변화 등을 연구하고 있는데, 도시의 토지피복에 대한 시간적 변화와 지표 특성에 의한 서울시 도시 공간의 열 환경을 해석하는 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 서울시의 도시개발과 녹지 관리정책 등의 지표 환경변화에 대한 문제를 고려하여 지표온도를 분석하고, 지표변화의 정도가 서울시의 도시 내부 기온변화에 대해 공간적으로 나타나는 경향을 해석하였다. 또한 이를 토지피복과 토지이용의 관점에서 토지피복 변화와 지표온도 변화 요인을 평가하였다.

II. 연구의 이론적 배경

환경정책평가연구원 기후변화센터에서는 급격한 기후변화에 따라 가장 심각한 문제가 되는 도시환경변화 요인으로 폭염에 의한 건강성 악화 및 사망자의 증가를 예측하였는데, 도시 공간의 열 환경이 급격히 변화하는 현상은 폭염의 시기에 서울시민의 건강성 악화를 증가 시키게 된다. 이러한 폭염의 기상학적 현상은 서울시의 도시 공간에서 도시 공간 지표의 열 환경 공간 특성에 따라 지역적으로 일사

병 등 도시 열 환경과 관련된 질병을 증가시키는 지역과 완화시키는 지역으로 공간 구분이 이루어질 것으로 판단된다(권영상, 2004). 이러한 열 환경의 피해 지역을 발생시키는 중요한 요소는 기후변화로 인해 여름철 평균 기온 상승과 더불어 사망률 및 질병률과 밀접한 관계를 갖는 폭염 일수의 빈도와 강도에 영향을 미치게 된다.

따라서 쾌적하고 건강한 도시환경을 조성하기 위해서는 도시계획차원에서 도시의 미기후적 환경을 고려한 도시 공간의 토지피복 지표 평가와 복사열에 의한 기온변화의 열 환경 용량 산정이 요구된다. 도시의 열 환경에 대한 공간적 효과에 대한 문제는 열 환경이 도시내부에서 공간적으로 어떤 분포를 나타내는지를 평가하는데 중요한 요소이다.

하지만 서울시의 열 환경 특성을 위성영상을 이용하여 도시의 지표면 열복사 특성과 비교하여 서울시의 도시 내부 열 환경 지표를 산출하고 도시공간의 열 환경용량을 해석하는 연구는 부족한 실정이다. 또한 고해상도의 디지털 항공사진을 이용하여 토지의 변화를 탐지하고, 토지의 이용계획과 토지피복의 관리 형태에 따라 도시의 열 환경 개선을 평가하고 쾌적한 도시 환경을 계획하는 것은 서울시의 도시 지표 열 환경관리에서 보다 효과적으로 도시 기후를 평가 관리할 수 있는 기법의 연구방법 제안이 된다고 판단된다. 공공시설의 녹지공간분포를 분석하여 열용량의 저감 효율을 판단하고, 이에 따른 열복사에너지의 흐름을 파악하는 것이 도시 발생 열을 저감하고 에너지 관리와 도시 활동인구의 기후변화에 따른 급격한 열 피해에 의한 인명사고를 저감하는데 매우 중요한 요소라고 할 수 있다.

도시의 개발은 숲, 야산, 농경지, 목밭 등의 녹지 환경이 도시 내부에 분포하는 면적을 급격히 감소시키고, 나대지와 콘크리트, 아스팔트 공간에서 일어나는 태양 방사량과 증발에 사용되는 에너지가 급격히 증가하여 기후학적 미기상 변화가 나타나는 원인이 되고 있다(강인식, 1995). 태양열의 복사에너지는 이러한 도시환경의 구성 요소 중 지표면 상태에 따라 도시내부로 유입되는 태양에너지를 증가

시키게 되는데 이러한 열에너지의 증가는 건물의 냉방과 교통시설과 같은 인위적 요인 등 다양한 열 발생원과 함께 도시의 기온을 증가시키는 요인이 된다. 특히 도시의 다양한 구조물은 열 용량 특성에 따라 열 반응의 시간적 차이와 대류현상과 같은 도시 미기후의 변화가 도시 안에서 일어나는 열 에너지의 이동에 영향을 주게 된다.

III. 연구방법 및 자료

지표온도 열적외선 위성영상자료의 획득은 서울시를 공간범위로 자료 획득이 이루어졌다. 서울시 전역을 동시에 관측하는 Landsat TM, ETM+ 자료(116-034; 1996년 9월 16일, 2000년 5월 7일, 2001년 9월 4일, 2006년 9월 13일, 2007년 7월 30일, 2009년 5월 8일, 2009년 8월 28일; 구름, 2009년 9월 13일, 2009년 9월 29일, 2009년 10월 15일, 2009년 12월 18일, 2010년 1월 3일, 2010년 2월 4일, 2010년 2월 20일)를 서울시 지역적 범위에서 지표면 열 관측 자료로 분석하였다(Fig 1).

열적외선 위성자료의 복사보정은 지표온도 분포도 등의 작성에 필요한 열 적외 원격탐사 자료를 토지피복 자료와 비교하였고, 지상관측의 기온 분포는 기상청 자동관측 장비에 의한 기온분포 자료를 활용하였다.

Fig 2는 연구의 절차와 분석결과에 대한 검증 과정을 연구 흐름도로 제시한 것이다. 서울시 토지피복의 공간 특성은 환경부 토지피복지도를 기반으로

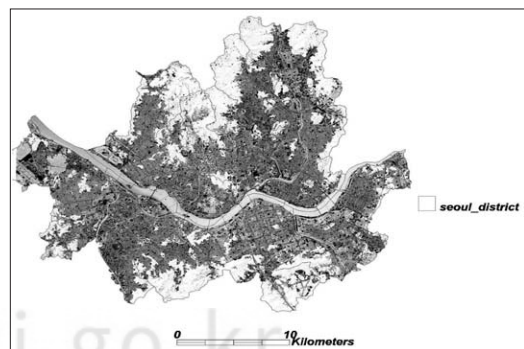


Fig 1. The study area and spatial surface distribution

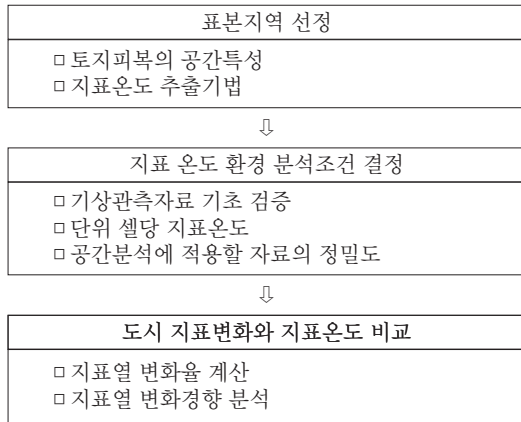


Fig 2. The diagram and analysis parameter of study

ArcGIS를 사용하여 2006년 서울시 토지피복 지도를 작성하였고, 이를 2011년과 2012년에 촬영한 디지털 항공사진(공간해상력 50cm, 삼아항업)과 중첩하여 토지피복이 변화한 지역을 ArcGIS를 사용하여 편집하였다. 최종적으로 수정된 수치지도의 토지피복지도를 위성영상에서 추출한 지표온도 지도와 중첩 비교하여 가장 최근의 토지피복 현황도와 각각의 위성영상 시기별 지표온도 지도를 작성하였다. 또한, 토지피복의 변화 지역을 구분하여 최신의 토지피복 지도와 위성영상에서 추출된 지표 온도의 관측시기별 지표온도 지도와 토지피복의 변화를 비교하였다.

위성에 의한 지표온도 지도는 각각의 위성사진 취득시점별로 작성하였는데, 이때 지표온도의 공간적 변화가 나타나는 지역의 특성을 등급화하였다. 지표온도의 변화 비교는 2006년과 2012년 토지피복 변화 지역과 비교하여 지역적 토지피복의 차이에 따른 지표온도의 공간적 분포를 제시하였다. 토지피복의 변화를 모든 위성사진과 비교하는 것은 과거 토지피복지도의 자료를 취득하기 어려워 최근 2006년과 2012년 토지피복 변화에 의한 변화지역과 획득된 위성영상의 모든 자료를 비교하여 각각의 시기별 지표온도 변화가 나타나는 공간적 범위를 등급 지도로 작성하여 제시하였다.

IV. 결과 및 고찰

서울시의 도시공간에 대한 지표 특성은 다양한

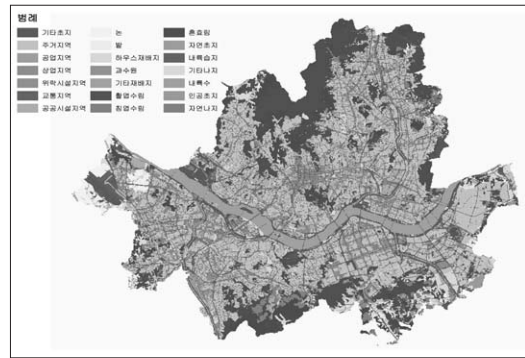


Fig 3. The land cover classification of seoul city (21 classified class)

공간 해상력에 의해 평가가 가능하다. 본 연구에서는 서울시를 촬영한 항공사진(ASD80 디지털 카메라)에 의해 도시 지표 특성에 대한 공간적 변화를 조사하였다.

Fig 3은 서울시의 지표 특성을 21개의 분류군으로 정하여 서울시 공간 특성을 나타낸 토지피복 지도이다. 토지피복의 형태와 면적, 인접 토지피복의 종류와 구성 등은 지역단위의 공간에서 도시내부의 지표온도와 기온에 영향을 나타내는데 이는 태양의 복사에너지와 지표 대상물질의 열복사 전도에 의한 열에너지 분포와 관계한다.

본 연구에서는 서울시 토지피복지도를 행정구의 단위로 세분화하여 서울시 구별 토지피복형태를 파악하였다. 서울시의 경우 피복형태에 따른 지표면 변화량은 다른 시-도에 비해 적은 면적에 해당하고 대부분 도심재개발과 도시공원 등의 확충이 토지피복의 주요 변화 인자로 나타났다. 이러한 서울시 토지피복 변화의 특성 중 가장 지표온도에 영향을 크게 미치는 인자는 나대지의 피복 형태인데 녹지가 아파트나 사업장 등의 토지피복으로 변화하는 과정에서 나대지 형태의 지표 특성을 나타내고 있다.

Fig 4는 서울시의 각 구별 토지피복지도의 제작을 강남구의 예로 나타낸 것이며 그림 5는 위성관측에 의한 지표온도 분포를 나타낸 것이다. 그림 4와 5의 비교에서 처럼 녹지와 공원 등의 지표는 건물과 도로 등의 지표 특성에 비해 10 -15(°C)의 차이를 나타내고 있는데 위성자료의 공간해상력이 120m×120m의 픽셀영역으로 21개 분류체계에 따른 지표

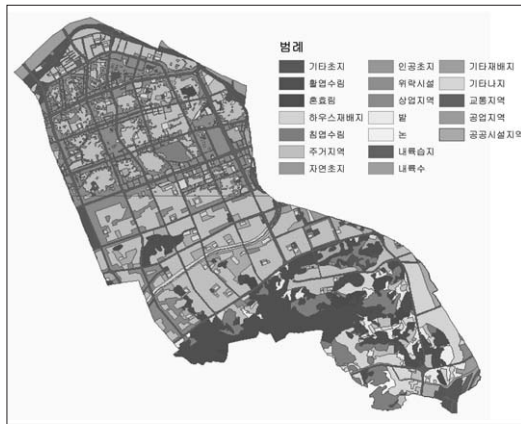


Fig 4. The land cover map of Gangnam-gu, seoul city

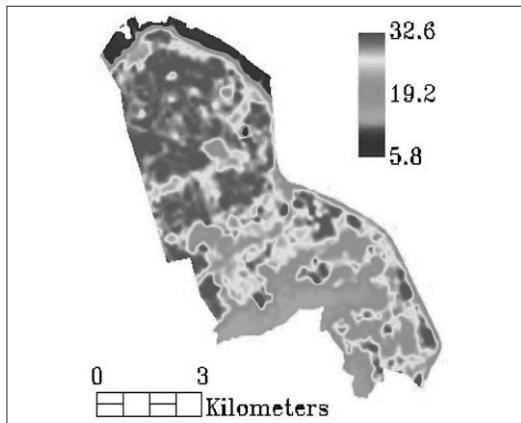


Fig 5. The surface temperature map from Landsat thermal infra-red band(Landsat ETM+; Sep 13, 2006)

온도를 구분하기 어려운 점을 파악할 수 있었다. 토지피복의 변화와 지표온도 변화특성은 매우 중요한 관계를 나타내는데 조현길 등(2009)은 기상자동측정망 기온 관측자료와 토지피복의 변화에 대한 변화를 단순회귀모델식을 산출하여 비교하였다. 그러나 토지피복의 형태에 따른 기온과의 변화는 매질의 차이에 의해 높은 상관성을 파악하기 어려운 실정이다.

특히 서울시 지표온도의 공간적인 분포는 토지피복의 형태 중 열복사에너지와 밀접한 관계를 가지는 대상물질에 따라 Fig 4, Fig 5와 같이 강남구의 지표온도 중에서 핫스팟 지점을 위성자료에서 산출하여 지표특성 분류 특성과 위성에 의한 지표온도 산출자료의 공간적 비교가 가능한 것으로 판단되었다.



(a)



(b)

Fig 6. (a) Digital airborne photography with land cover digital map from 2011 to 2012(yellow: bare soil area), (b) digital land cover map overlap with surface temperature from satellite image Sep 13, 2006.

지표온도 변화의 특성은 도시개발과 같은 지표특성의 변화에서 크게 지표온도 변화량을 관찰할 수 있는데 아파트나 도심재개발과 같은 지역은 나대지의 형태를 나타내고 있어서 도시 지표온도의 변화에 중요한 영향인자이다(Fig 6).

Fig 6은 서울시의 도시지역과 공원, 산림 등의 토지피복에서 도시 지표온도의 저감에 기여하는 식생 분포지역과 도시 지표 온도 상승에 기여하는 특성을 지닌 도시 내부의 나대지와 아스팔트, 콘크리트 지역의 공간적 특성을 구분하여 제시하였다.

디지털 항공사진의 공간해상도 50cm의 항공사진자료에 의한 나대지 구분은 지표 온도 지도의 이상지역을 찾는데 적용 가능 하였고, 인공위성 영상 자료를 이용한 원격탐사기법은 광범위한 지역의 지표면 지표온도자료를 획득할 수 있어 도시 지표온도 변화를 연구하는데 활용 가치가 높은 것으로 파악되었다. 토지피복의 변화에 따른 지표온도의 변화는 해당지역의 전체적인 기온변화에 영향을 미치

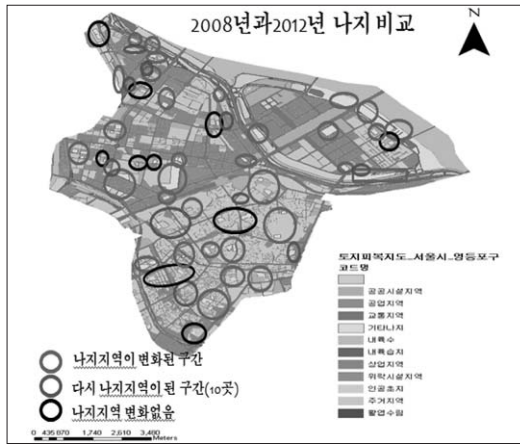


Fig 7. Bare soil change detection of land cover digital map from 2008 to 2012

는데 본 연구에서는 토지피복변화의 관측을 2011년과 2012년 항공사진으로 작성하였다(Fig 6(a)).

Fig 7은 서울시 영등포구의 지표온도 변화 요인 중 토지피복의 변화가 나타난 지역을 변화탐지 피복지도로 구분한 것이다. 지표온도는 개발지역인 내대지 지역에서 공간적 차이가 뚜렷하게 구분되는데 이러한 내대지와 같은 지표온도 변화 핫스팟 지역을 Landsat 열적외 관측에 의한 서울시의 지표온도 변화 정도를 비교하였다. Fig 8은 연구에 사용된 개별 위성영상의 지표온도를 나타낸 것으로 1996년 9월 영상자료를 기반으로 서울시 지표온도 공간분포 지도를 작성하여 제시하였다. Fig 6과 Fig 7과 같이 지표 온도의 변화가 다른 시기의 지표온도 지도 보다 높게 나타나는 핫스팟 지역을 등온도 분포 지도에 Fig 8과 같이 제시하였다.

본 연구에서는 지표온도 변화 관측에 의해 생태하천, 식생 분포지역과 고층 건물, 여의도 공원, 인공 녹지 지역의 평균 지표 온도의 변화를 Fig 8과 같이 작성된 지도에서 비교하였다. 영등포구의 지표 온도 변화 특성은 약 2.5~5.4°C(평균 3.0°C)의 범위이며, 지표 온도의 변화는 영등포 AWS 기온 관측자료의 변화의 특성에 나타난 서울시 도시 기온변화 보다 높게 나타나고 있다.

서울시 지표 특성의 변화를 고려할 때 연구지역의 지표 온도는 10년간 평균 지표 온도의 증가 지역

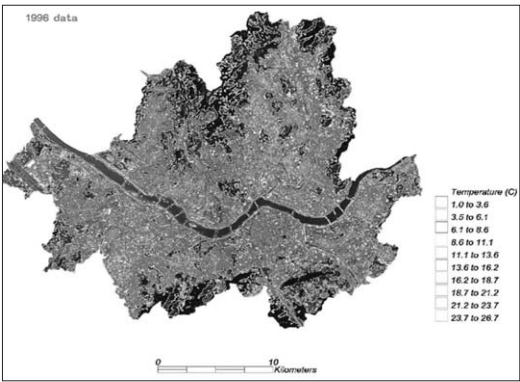


Fig 8. The change of land surface temperature in seoul city Sep. 1996

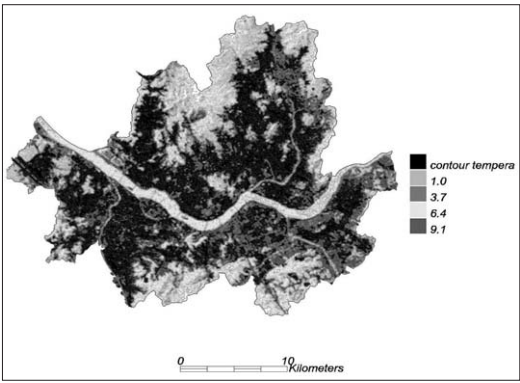


Fig 9. The contour map of land surface temperature in seoul city from Sep. 1996 to 2010

이 평균 1.5~2.4°C의 범위로 나타났다. 지표 온도 변화 관측 자료를 기반으로 하여 서울시의 지표온도 변화는 Fig 9와 같이 작성하고, 서울시 지표온도 변화의 변화 정도를 4개 등급으로 구분하여 제시하였다.

다만 인공위성 영상 자료 취득 당시의 이상기후 현상이나 우천 등의 기상악화는 대상지 지표온도에 전반적인 영향을 미칠 수 있어 연구대상지를 중심으로 취득일의 기상상태에 대한 고려가 필요하였다. 자동기상측정망 자료 중 각 인공위성영상자료의 촬영시기를 기준으로 촬영 전 2일, 촬영일, 촬영 후 1일의 4일간의 기상개황을 분석한 결과 대체적으로 촬영전과 촬영후의 기온, 풍속 등의 심한 변화는 없었으며 강우로 인한 급격한 온도변화도 없는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 광범위한 지역의 지표온도 자료

추출이 가능한 인공위성 영상의 지표온도 자료와 인공위성영상자료에서 분석하기 어려운 도심의 토지피복현황 조사 자료를 연계하여 서울시 전체의 지표온도변화와 지표 온도 변화에 미치는 지표 특성을 공간적으로 파악하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 서울시의 도시 지표온도에 영향을 미치는 토지피복변화와 1996년부터 2010년의 Landsat 위성자료에 의해 서울시 지표온도 지도를 작성하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 다음과 같은 시사점을 도출하였다

1. 서울시 지표온도 변화 영향요인은 토지피복 변화의 평균 지표 온도 저감 효과에 의해 콘크리트와 아스팔트, 나대지 공간 밀도에 따른 지표온도 증가가 나타났다. 이를 공간적으로 추출하기 위해 서울시 지표 온도 변화 정도를 산출하였고, 지표 온도값의 등간 구분값을 이용하였다.

2. 인공위성 영상분석을 통한 도시온도 추출과 지표 온도 변화율을 4개 등급으로 구분하였다.

3. 연구대상지 전체 평균 온도는 지표 온도를 기준으로 21.85°C(한강과 하천 및 호수 포함)로 기온과 평균 온도 차이가 6°C정도 온도차가 있는 것이 토지피복 변화 지역에서 분석되었다. 서울시 지표 온도 변화의 토지피복 변화 영향 요인 분석은 항공사진으로 구분하여 비교하였으나, 본 연구에서 적용한 Landsat TM, ETM+의 공간해상도 적용에 있어서 도시 지표의 공간 구조가 복잡할수록 지표 온도 산출값의 오차를 비교하기 어려웠고, 식생밀도가 높은 대상지의 지표온도는 등급 오차가 낮은 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 남서울대학교 2012년 교내연구과제의 연구지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- 강인식, 1995, 지구온난화의 불확실 요소들에 대한 평가. 한국기상학회지, 31(2), 187-190.
- 권영상, 2004, Landsat ETM+ 영상자료를 이용한 하천의 도시기온 저감효과 측정에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 조경학 석사학위논문.
- 권영아, 2002, 서울의 도심녹지가 주변기온에 미치는 영향. 건국대학교 대학원 박사학위논문, 110.
- 김학열, 2003, 도시환경인자에 따른 대기온도 변화 연구-서울시를 대상으로, 국토계획, 38(5), 259-269.
- 김경환 등, 2000, 한반도 기온 변화에 나타난 도시화 효과 검출에 관한 연구 한국기상학회지 36(5), 519-526.
- 김수봉 등, 2001, 도시열섬현상의 원인과 대책, 환경과학논문집, 6(1), 63-89.
- 기경석 · 이경재, 2009, 대도시 외곽지역 논경작지의 토지이용 및 피복변화에 따른 온도 변화 모형 연구, 한국조경학회지, 37(1), 18-27.
- 김현옥 등, 2012, 도시지역의 토지피복유형이 지표면 온도에 미치는 영향; 경기도 일산 신도시를 중심으로, 대한원격탐사학회지, 28(2), 203-214.
- 노재식, 1973, 서울지방의 기온상승경향에 대하여. 한국기상학회지, 9(2), 49-58.
- 백상훈 · 정응호, 2009, 위성영상의 시계열 분석을 통한 미기후변화 분석-대구시 달서구를 대상으로-, 한국지리정보학회지, 12(2), 34-43.
- 박민호, 2001, Landsat TM 열적외데이터를 이용한 도시열섬효과에 관한 연구, 측량 및 지형공간정보, 21(6), 861-874.
- 박경훈 · 정성관, 1999, 광역적 녹지계획 수립을 위한 도시열섬효과분석, 한국지리정보학회지, 2(3), 35-45.
- 박인환 · 장갑수 · 김종용, 2005, 추이대를 중심으로 한 경상북도 3개 도시의 열섬 평가 환경영향평가, 8(2), 73-82.

- 송영배, 2004, 도시기후지도의 작성 상계 4동을 중심으로, 한국조경학회지, 29(6), 26-37.
- 송영배, 2002, 신도시개발이 도시열섬효과 형성에 미치는 영향, 한국조경학회지, 30(4), 37-46.
- 안지숙, 2007, 환경친화적 도시계획을 위한 열환경 평가에 관한 연구, 계명대학교 대학원 박사학위논문, 167.
- 엄대용, 2006, 원격탐사 자료에 의한 지표온도추출 정확도 향상에 관한 연구, 한국지리정보학회지, 9(2), 159-171.
- 윤민호, 2009, 원격탐사를 활용한 녹지가 도시기온에 미치는 영향 연구-서울시를 대상으로-, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 64.
- 윤일희 · 민경덕 · 김경익, 1994, 대구 지역의 기상 특성연구 및 대기 확산 모델의 개발, II. 도시 열섬특성에 관한 사례 연구, 한국기상학회지, 30(2), 303-313.
- 윤용한 · 박봉주 · 김원태 · 박선영, 2008, 공원녹지의 토지피복비율과 기온간의 요인분석, 한국환경과학회지, 17(5), 485-491.
- 이성열, 2007, 도시지역 토지유형별 열 환경 특성분석에 관한 연구-수원시 이의동을 중심으로-, 협성대학교 대학원 석사학위논문, 110.
- 이강국 · 홍원화, 2008, 도시 열환경 유형 분석 및 완화방안에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 24(9), 253-260.
- 이은주, 2006, 도시공간 구성요소와 열 쾌적성과의 관련성 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문, 75.
- 이종범 외, 1993, 춘천지역 도시열섬의 특성과 대기 질에 미치는 영향, 한국대기보전학회지, 9(4), 303-309.
- 이광호 · 정인숙, 2002, 전주 지역에서의 도시 열섬에 대한 연구, 전북대, 27, 1-7.
- 이용식, 1990, 도시열섬 분석에 있어서 원격탐사 기법의 적용에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 석사학위논문.
- 이현영, 1989, 원격탐사기법에 의한 도시열섬 연구, 지리학, 14, 1-13.
- 엄정희, 2012, 도시계획에서의 기후요소 평가기법에 관한 고찰, 환경정책연구, 11(1), 27-48.
- 오규식 · 홍재주, 2005, 도시공간 구성요소와 도시 열섬현상의 관련성 연구, 한국도시계획학회지 6(1), 47-63.
- 조현길 · 안태원, 2009, 도시기온에 작용하는 입체적 토지피복의 영향, 한국조경학회지 37(3), 54-60.
- 정종철, 1999, Landsat TM을 이용한 표층수온 분석 오차, 대한원격탐사학회지, 15(1), 1-8.
- 정종철, 2009, 지표방사율에 의한 지표온도와 도시 열섬효과 비교, 한국환경영향평가학회, 18(4), 219-227.
- Balling, R. C., and Brazell, S. W., 1988, High resolution surface temperature patterns in a complex urban terrain. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 54, 1289-1293.
- Markham, B. L. and J. L. Becker, 1986. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. EOSAT landsat Tech Notes, 1, 3-8.