

연구논문

서울 도심지의 인본열에 의한 지표온도 분석: 위성영상 적용 사례

방건준 · 박석순

이화여자대학교 환경공학과

(2010년 5월 24일 접수, 2010년 7월 26일 승인)

Analysis of the Land Surface Temperature by the Anthropogenic Heat in the Urban Area of Seoul: An Example in Application of Satellite Images

Kon Joon Bhang · Seok-Soon Park

Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

(Manuscript received 24 May 2010; accepted 26 July 2010)

Abstract

The increase of the solar reradiation from urban areas relative to suburban due to urbanization heats up the air temperature in urban areas and this is called the urban heat island (UHI) effect. This UHI effect has a positive relationship with the degree of urbanization. Through the studies on UHI using the satellite imagery, the effect of the surface heat radiation was observed by verifying the relationship between the air temperature and the land cover types (surface materials such as urban, vegetation, etc.). In this study, however, the surface temperature distribution was studied in terms of land use types for Seoul. Using land use types, the surface temperature in urban areas such as residential, industrial, and commercial areas in Yeongdeungpo, highly packed with industrial and residential buildings, was maximum 6 °C higher than in the bare ground, which indicated that the surface temperature reflected the pattern of the human-consumed energy on the areas and showed that one of the important causes influencing the air temperature except the surface heat reradiation by the sun is the anthropogenic heat. Also, the effect due to the restoration of the Chunggae stream on UHI was investigated. The average surface temperature for the Chunggae stream was reduced about 0.4 °C after restoration. Considering that each satellite image pixel includes mixture of several materials such as concrete and asphalt, the average surface temperature might be much lower locally reducing UHI near the stream.

Keywords : surface temperature distribution, land use, land cover, anthropogenic heat, remote sensing

1. 개요

지구 온난화는 인구의 증가와 여러 가지 인간의 활동으로 인하여 야기되는 거대한 변화로 이해되고 있다. 인간의 활동 중 도시화를 통하여 지역적 환경에 여러 가지 영향을 미치는데, 인간의 활동에서 비롯된 대기 중의 부산물들, 예를 들어, 자동차나 공장에서 배출되는 이산화탄소와 같은 물질의 배출로 대기권 내의 이산화탄소 양을 증가시켜 기온을 높게 되고, 이로 인하여 오랜 동안 지속되어온 자연 환경에 적지 않은 영향을 미치게 된다. 또한 도시화로 인하여 식생으로 덮여 있던 지표가 콘크리트나 아스팔트와 같은 구조물로 대체 되면서 식물의 에너지원으로 사용되던 태양열이 콘크리트나 아스팔트로부터 재복사 되어 도심지역의 기온이 인근 비도시지역의 기온보다 상대적으로 높아지게 되는 도시열섬효과(Urban Heat Island Effect)를 초래한다. 인구의 증가로 도시화가 많이 진행된 지역일수록 도시열섬효과의 강도도 비례하여 증가하고, 국지 기상 조건들이 바뀌게 되는 현상이 나타나게 됨이 많은 연구들에 의해 관찰되었다 (Yague *et al.*, 1991; Klysik and Fortuniak, 1999; Montavez *et al.*, 2000).

도시열섬효과에 대한 이론은 Landsberg(1956), Atwater(1972), Oke(1982)등을 통해 구체화되었는데, 이들은 도시의 피복 상태, 도심지역에서의 지표열 발산, 바람의 속도, 구름의 양, 도심지의 지리학적 위치와 규모, 인간의 활동에 의해 방출되는 열(예, 자동차, 공장) 등을 도시열섬효과에 영향을 미치는 인자로 보았다. 도심지역의 지표에서 방출되는 열이 대기에 미치는 영향을 아직 명쾌하게 밝히지는 못했지만, 최근에는 원격탐사 기술의 발달로 이에 대한 더욱 구체적인 상관성을 확인하였고 (Roth *et al.*, 1989; Carnahan and Larson, 1990; Gallo *et al.*, 1993; Nichol, 1994; Lo *et al.*, 1997; Gallo and Owen, 1998; Owen *et al.*, 1998; Weng *et al.*, 2004; Strathopoulou and Cartalis, 2007; Bhang and Park, 2009), 이를 통하여 도시화에 따른 지표의 온도 분포와 열섬현

상에 관한 많은 정보가 알려지게 되었다.

도시열섬현상은 도심화가 극도로 진행된 서울에서 흔히 나타난다. 서울(그림 1)은 대한민국의 수도로 1,000만이 넘는 인구를 가진 세계에서 여섯 번째로 인구밀도가 높은 도시로 1930년대부터 시작된 서울의 도시변화는 현대화가 가속화된 지난 60년대 후반에서 70년대를 시작으로 90년대를 거치며 사실상 현재의 도시의 모습을 갖추게 되었다. 이때까지는 아직 국내에서 열섬효과에 대한 연구가 미비했기 때문에 도시의 건물이나 구조가 도시열섬현상을 완화시키기 위한 정책적 단계까지는 미치지 못하였다. 현재는 외국의 여러 나라에서 도시열섬현상을 '심각한 부작용'으로 인식하고 이를 완화시키기 위해 건물설계와 도시설계를 정책적으로 규정해 나가고 있다. 우리나라에서도 지붕에서 태양열의 흡수를 방지하기 위하여 옥상에 녹지를 조성하거나 페인트를 이용하여 태양광을 반사시키는 등의 노력들이 이루어지고 있으며 태양광 집열판을 설치해 그린에너지를 생성하는 등의 노력으로 도시열섬현상을 이해하며 조금씩 변화되고 있다.

이러한 도시열섬효과에 대한 연구는 급속히 도시화가 진행된 서울과 같은 경우에 특히 중요한데, 최근 10년간 증가하는 서울의 도시열섬효과와 열대야 현상은 기후온난화 현상과 더불어 심각한 이상기후의 징후를 보여주고 있다. 지난 수 십 년간의 서울의 기온변화를 살펴보면 2006년을 기준으로 서울

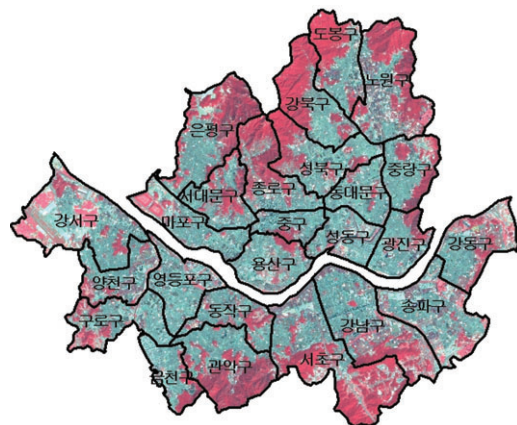


그림 1. Landsat으로 본 연구지역(서울)

의 평균기온은 한반도 평균보다 약 1.4배 그리고 전 지구의 평균보다 무려 3.3배가 높음이 밝혀졌는데(기상청, 2008), 이러한 원인으로서는 서울 지역의 도시화에 의한 도시열섬현상이 한 몫을 하고 있다. 또한 1990년 이전의 10년 동안 서울의 대기 오염도는 이산화황(SO₂)과 같은 오염물질의 증가가 도시열섬현상과 맞물려 증가하고 있음이 장영기와 김정옥(1991)에 의해 알려 졌고, 전날 최대 도시열섬강도가 열섬효과에 큰 영향을 미치고 있음이 Kim and Baik(2002)에 의해 밝혀졌다. 또한 Bhang and Park(2009)은 도시화된 지역의 지표온도가 도시화된 지표의 거칠기와 건물간의 간격과 같은 표면의 조직 구조에 의해 영향을 받음을 확인한 바 있다.

서울 지역의 재개발은 계속 진행이 되고 있으며 서울의 환경문제의 심각성을 고려해 볼 때 도시열섬현상의 저감 노력은 간과되어서는 안 되는 중요한 문제이다. 하지만 이에 대한 구체적인 연구가 아직 많이 부족한 상황이다. 특히 공간적 분포를 보여주는 위성영상을 사용한 기존의 많은 연구에서는 지표의 피복도(Land cover)를 이용한 연구들이 주류를 이루어져 왔기 때문에(Gallo *et al.*, 1995; Weng *et al.*, 2004; Stathopoulou and Cartalis, 2007; Stathopoulou and Cartalis, 2009; Li *et al.*, 2009) 도시열섬현상을 개선하고자 하는 노력도 이러한 결과에 부흥하는 피복 변화에 집중되어 시행되어왔다. 현재 환경문제는 피복 물질의 개선보다는 인간이 사용하는 에너지의 사용 자체에 더 큰 관심을 가지게 되었고, 이러한 결과로 에너지 절약이나 대체 에너지의 사용에 더 많은 관심을 가지게 되었으며, 국제적으로 에너지의 효율적 사용을 위한 많은 노력이 이루어지고 있다.

이러한 에너지 사용의 관점에서 지표온도의 분포를 관찰하기 위해서는 토지피복이 아닌 토지이용 상태를 파악할 필요가 있다. 현재 사용 중인 토지를 분류하는 방법은 크게 두 가지가 있는데, 토지피복(Land Cover)과 토지이용(Land Use)이다. 많은 경우 이 둘은 혼용이 되어 사용되고 있지만, 실제로는 다음과 같은 개념을 가지고 있다. 토지피복(LC)은 지

표를 덮고 있는 물질에 관점을 두고 지표를 나누는 방법이고, 토지이용(LU)은 물질보다는 지표가 실제로 인간에 의해 어떻게 이용되고 있는지에 대한 이용 상태를 바탕으로 지표를 구분하는 방법이다.

기존의 위성영상을 사용한 연구에서는 토지피복과 지표온도의 분포의 상관성을 통하여 인간의 활동이 지표의 피복에 미치는 영향과 이에 대한 환경 변화(예, 도시열섬현상)에 대한 관계를 보여주었다. 하지만, 도시열섬현상은 피복으로 부터의 태양열 재복사 이외에도 또 실제 인간의 활동에 의해 사용된 에너지(인본열-Anthropogenic Heat) 복사로 이루어짐을 고려할 때, 인간의 에너지 사용으로 인하여 지표 온도 분포에 미치는 영향도 함께 연구되어야 한다.

이에 본 연구에서는 인간의 활동에 의한 에너지의 사용에 초점을 맞추어, 인간의 토지이용에 따른 에너지 사용이 지표온도에 미치는 영향을 관찰하고자 하였다. 인간의 활동에 의해 도심지역에서 방출되는 열의 특성을 Landsat 위성 영상을 이용하여 제작된 토지이용도를 이용하여 지표의 온도분포를 추출하고 이를 바탕으로 토지 이용에 따른 지표온도분포를 관찰함으로써 서울을 대상으로 조사된 지표열의 방출의 특성과 도시열섬현상의 원인이 될 수 있는 요소에 대하여 관찰하였으며, 청계천 복원으로 인한 지표온도의 영향도 함께 관찰하였다.

II. 연구지역

연구지역은 한반도에서 도시화가 가장 많이 진행된 서울특별시를 택하였다(그림 1). 서울은 대략 북위 37° 33' 에 위치해 있고 기온은 삼한사온의 특성을 가진 온대의 특색을 나타낸다고 알려져 왔지만, 최근 들어, 지구온난화의 영향과 인구 1,000 만 명이 넘는 대도시에서 전형적으로 나타나는 도시열섬현상으로 인해 점차 열대기후로 접어들고 있다. 1970년대 이후 서울 중심부에 인구집중과 급격한 고층화, 도시화로 인해 도시기후를 크게 변화된 것으로 알려져 있는데, 1931년에서 1960년까지의 연평균 기온은

11.1 °C에서 1950년에서 1980까지 11.6 °C로 0.5 °C가 증가 하였고(서울특별시, 1997), 기상청 자료에 의하면 2000년부터 2008년까지 지속적인 기온 상승으로 인한 온도증가(약 0.5 °C)는 최근 백년간의 전 지구적 규모의 온도상승과 맞먹는 증가량이었다(기상청, 2009). 서울시 자료(1997)에 따르면 서울의 열섬효과는 종로, 서울역, 영등포 등의 도심지에 큰 열섬이 나타나며 오전 6시경에 열섬강도가 가장 크게(약 6 °C) 그리고 오후 2시경에 열섬강도가 가장 작게(약 2 °C) 나타나는 것으로 알려져 있다.

서울은 한반도의 0.28 %에 해당하는 면적(605.27 km²)으로 (2008년 12월 31일 기준) 인구 약 10,456,000 명의 거대도시(Metropolitan city)로 25개의 자치구를 가지고 있다. 서울의 도시화는 1960년대 이후 경제발전과 더불어 본격적으로 가속화되었고, 서울은 확장 보다는 과거 발전 이후 변화되지 않은 지역에 대한 재개발이 현재 중점적으로 이루어지고 있다.

III. 자료 및 방법

1. 자료의 선 처리

본 연구에 사용된 자료는 Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)로 얻어진 영상으로 토지피복 분석, 식생구분이나 지표 열 감지 등 여러 분야에 응용이 되고 있는 대표적 다중분광영상(Multispectral images)이다. 한 개의 영상은 폭 185 km로 영상의 지표상 총면적은 34,000 km²이다. ETM+ 시스템은 총 8개의 채널을 가지고 있는데, 전정(panchromatic) 채널 해상도 15 m, 가시광선(visible)과 적외선(infrared) 채널 해상도 30 m, 그리고 온도(thermal) 채널 해상도 60 m의 영상을 만들어 낸다. 본 연구에서는 2003년 6월에 Line Scanner Corrector(LSC)의 고장으로 2003년 6월 이후의 영상에 생기는 스트립(strip) 형태의 결점을 피하기 위해 스트립이 있는 영상은 Landsat-5 Thematic Mapper (TM) 자료로 대체하였다. ETM+에 대한 TM 자료의 차이점은 TM에

는 전정 채널이 없고, 온도 채널의 해상도가 120 m인 것을 제외하고는 ETM+와 동일하다. 자료는 미국지질측량국(U.S. Geological Survey - USGS)의 데이터베이스(glovis.usgs.gov or edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer)에서 제공하는 Level 1G 자료로, 무료 다운로드가 가능하며 기하보정(Geometric correction)과 방사보정(Radiometric correction)이 적용되어 있다. 하지만 대기 중의 작은 물방울이나 분진 등과 같은 입자에 인한 대기효과로 인해 지표에서 복사된 열적외선(Thermal Infrared)이 지표에서의 복사와는 다르게 위성의 센서에서 입력되기 때문에 이 효과를 보정하기 위하여 대기보정(Atmospheric correction) 작업을 시행하였다.

대기 보정 작업은 대기 중의 연무(Haze)에 의한 영향이 약 5 %라는 가정을 바탕으로 Chavez(1996)가 제안한 COST 방법을 사용하였다. 영상을 사용하여 지표의 방출률(Emissivity)을 결정하기 위하여 Sobrino *et al.* (2004)이 제시한 정규화된 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index - NDVI)를 사용하였고, 계산된 방출률을 사용하여 온도채널 영상의 픽셀 값들을 수정한 후 실제 지표상의 온도(at-surface temperature)를 추출하였다. 방출률 결정에 관한 자세한 내용은 Sobrino and Raissouni(2000), Sobrino *et al.*(2001), Sobrino *et al.*(2004), Stathopoulou and Cartalis(2007)의 논문을 참조하였다.

위의 방법을 통하여 얻어낸 보정된 Landsat 위성 영상과 구글 어스를 사용하여 토지피복과 이용 분류를 실시하였다. 토지피복(Land cover)은 위성영상을 이용한 무감독분류(Unsupervised Classification) 방법을 적용하였는데, ISODATA 알고리즘(Lillisand *et al.*, 2008)을 사용하여 먼저 50개의 클러스터(Clusters)로 나눈 뒤 각 클러스터를 식생, 도심, 물, 나지, 기타로 재분류(감독분류)하였다. 각 피복의 정확도는 랜덤 제너레이터(Random Generator)로 영상에 500개의 랜덤 포인트(Random Points)를 생성하고 각 분류에 속해있는

랜덤 포인트가 실제로 같은 분류의 피복 상태인지의 여부를 확인하였는데, 정확도가 각 분류별 90% 이상 되도록 하였다.

토지이용 분류(Land Use Classification)는 서울시 건물이용도와 구글 영상을 사용하여 수작업 디지털화(Manual Digitizing)를 원칙으로 분류하였는데, 수작업의 어려움으로 영등포와 강북구만을 대상으로 환경부의 토지피복분류법에 따른 중분류 중 서울에만 해당되는 총 12개 항목으로 분류하였으며, 피복상태에 대한 정보가 없고 분류가 애매한 경우는 구글 어스의 고해상도 영상을 참조하여 피복의 특성(텍스처, 색의 특징, 등)이 가장 유사한 주변 지역의 피복으로 대체하였다. 이 작업을 위하여 구글 어스(Google Earth)의 고해상도 영상을 JPG 영상으로 저장한 후 ArcGIS에서 좌표등록(Georegistration)을 실시하여 Landsat의 영상과 맞추었다. 구글 영상은 Landsat 영상과 함께 공히 구별이 용이한 6개의 물체를 제어점(Control Points)으로 선택하여 ArcGIS의 Georeferencing 툴을 사용하여 투영하였는데, 2차 방정식(2nd degree polynomial)을 사용하여 제공된 평균제곱오차(Root Mean Square Error - RMSE)가 0.05 보다 작은 값이 되도록 하였다. 사용된 기본 투영법은 Landsat의 투영법인 Universal Transverse Mercator(UTM-Zone N25)를 따랐다.

2. 온도 추출 및 이후 작업

영상의 온도 추출은 NASA에서 제공된 Landsat-7 Science Data Users Handbook (2009)의 Data Product 부분에서 제시한 방법을 적용하였다. 선 처리(Pre-processing)에서 보정된 온도 채널의 픽셀 값(L_i)을 아래의 온도 산출 식에 대입하여 변환하였다.

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_i} + 1\right)} - 273.15$$

여기서, L_i 는 영상의 픽셀 값을 나타내며 제시된 방법대로 Landsat-7의 경우 $K_1 = 666.09$, $K_2 =$

1282.71, Landsat-5의 경우 $K_1 = 607.76$, $K_2 = 1260.56$ 을 사용하였다. 추출된 온도는 Landsat에서 유도한 서울 지역의 토지피복/이용도를 이용하여 서울의 지표 피복/용도별 평균 온도를 산출하였다.

IV. 결과

1. 구별 지표 온도 분포

서울의 각 구에 대한 지표온도를 관찰하기 위해 2000년부터 2008년까지의 Landsat-5와 Landsat-7에서 얻은 여름과 겨울의 영상을 사용하여 구별 지표온도를 분류하였다. 그림2는 해당 영상들의 구별 평균온도와 표준편차를 나타낸다. 지표의 온도가 높은 지역은 동대문구, 용산구, 영등포구, 마포구, 성동구로 이들은 2000년부터 2008년까지 여름동안 서울시에서 지표 온도가 가장 높은 지역으로 확인되었다.

도시화의 영향을 구체적으로 알아보기 위하여 크게 5 가지(식생, 도심, 물, 나지, 기타)로 분류한 토지피복도를 바탕으로 각 구별 피복의 구성을 관찰한 결과(표 1), 도시화가 80% 이상 이루어진 지역은 동대문구, 마포구, 성동구, 영등포구, 용산구 등으로 지표 평균 온도가 높은 구와 일치하는 결과를 보여주었으며, 반대로 녹지가 많은 지역은 평균온도가 낮았다. 이는 기존의 연구들에서 나타난 도시열섬 강도(Urban Heat Intensity - UHI)가 지표온도를 구속하는 도시화 정도에 비례하며, 녹지의 양과 반비례 관계가 있음을 잘 설명해 준다. 이 원인은 식생지역에서는 태양열이 식생에 필요한 에너지 공급에 사용되고 나머지 열을 복사함으로써 식생지역의 지표온도가 낮게 측정되며, 도심지역에서는 태양열이 지표에 의한 사용이 없이 반사와 지표 재복사의 형태로 방출되기 때문에 상대적으로 도심지역의 지표온도가 높게 측정된다.

서울의 지표온도가 높은 지역은 1980년대 이전에 지어진 단층 또는 낮은 건물들이 상가나 단지를 이루고 있었는데, 노후된 건축자재와 관련이 있음을 간접적으로 보여준다. 또한 본 연구를 위한 선행

표 1. 서울의 토지피복에 따른 면적비율 (%)

	Vegetation	Urban	Ground	Misc.	Sum
Gangnam	28.4	62.3	4.5	4.8	100.0
Gangdong	27.8	60.8	9.3	2.1	100.0
Gangbuk	57.1	39.9	2.1	0.9	100.0
Gangseo	25.2	55.4	17.4	2.1	100.0
Gwanak	51.6	44.5	2.2	1.7	100.0
Gwangjin	21.1	69.7	5.8	3.3	100.0
Guro	23.7	65.7	6.0	4.5	100.0
Geumcheon	23.0	67.5	6.3	3.1	100.0
Nowon	48.5	42.7	5.8	3.0	100.0
Dobong	49.0	43.7	4.5	2.8	100.0
Dongdaemun	7.9	82.2	4.9	4.9	100.0
Dongjak	19.7	72.2	4.1	4.0	100.0
Mapo	15.4	71.3	9.7	3.5	100.0
Seodaemun	31.5	62.8	2.9	2.8	100.0
Seocho	49.3	43.3	5.4	2.0	100.0
Seongdong	7.7	77.9	6.9	7.5	100.0
Seongbuk	34.2	59.2	4.0	2.6	100.0
Songpa	16.3	68.6	11.2	3.9	100.0
Yangchon	17.2	72.4	5.8	4.6	100.0
Yeongdeungpo	6.4	80.5	8.3	4.8	100.0
Yongsan	14.7	76.7	5.6	3.0	100.0
Eunpyeong	50.5	43.8	4.9	0.7	100.0
Jongno	47.6	47.0	3.7	1.7	100.0
Jung	13.9	76.8	2.8	6.5	100.0
Jungnang	31.1	61.6	4.7	2.6	100.0

자료처리 과정 중 물은 그 비율이 미미하고 본 연구에서 중요성이 없으므로 Misc.에 포함시켰음.

연구(Bhang and Park, 2009)에서 도심 표면의 피복 재료와 구조에 따른 지표 온도 분포의 변화에 대한 관찰을 통해서 중구 내에서 도심 지역도 온도의 차이를 보였고, 지표 온도가 높은 지역은 피복 재료가 오래된 건축자재들(노후된 슬레이트와 콘크리트 기와 등)로 이루어져 있음을 확인할 수 있었다. 특히 발열이 심한 종로구의 오래된 상업단지의 실제 모습을 찍은 사진은 주변이 상대적으로 낮은 온도를 보이는 지역 보다 구조적인 몇 가지 차이점들이 관찰 되었는데, 좁은 골목길과 상대적으로 편평한 건물들의 높이가 지표 복사열에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다(Bhang and Park, 2009).

2. 서울의 토지이용 구분에 따른 온도 변화

토지이용에 따른 지표온도 분포를 관찰하기 위해 인공 구조물(예, 건물, 도로) 등이 차지하는 비율이 가장 높은 영등포구와 가장 낮은 강북구를 대상으로 거주지, 공장, 상업, 위락시설, 교통지역, 공공시설 등 환경부의 토지피복분류법의 중분류에 맞추어 이용도를 제작하여 지표온도를 조사하였다. 사용된 자료는 Landsat-5 TM 영상으로 2006년 9월 10 일자를 사용하였다.

표 2는 지표의 평균 온도와 표준편차를 나타내는데, 영등포와 강북구 모두 지표 온도가 가장 높은 곳은 모두 거주지, 공장, 상업, 교통 지역 등으로 도시화된 지역에서 나타나고 있다. 특히 낮은 건물이 밀집한 영등포의 거주 지역은 상대적으로 지표온도가 높게, 그리고 상업지역과 공업지역이 그 뒤를 이었다. 강북구의 경우도 비슷한 추이를 보이는데 거주, 공장, 상업 지역들이 온도 상 큰 차이는 보이지 않았지만, 역시나 이들 지역에서 높게 나타났다. 나 지의 경우는 도심 지역보다 모두 낮은 지표온도를 보여주고 있다.

표 2. 영등포와 강북구의 토지이용에 따른 지표온도의 평균값과 표준편차

	Yeongdeungpo		Gangbuk	
	Mean	STD	Mean	STD
110	37.8	1.30	31.6	1.58
120	33.9	1.68	-	-
130	32.0	1.63	31.8	1.32
140	30.6	1.32	-	-
150	31.6	1.59	31.7	1.34
160	32.0	1.30	30.5	1.61
220	-	-	25.9	0.41
310	-	-	24.8	1.03
320	-	-	24.9	1.10
330	-	-	26.0	1.42
430	29.3	1.60	26.4	1.39
620	31.9	1.21	29.0	1.77

토지이용은 환경부의 피복분류 중분류법을 따랐으면 분류된 토지이용은 다음과 같다. 거주지(110), 공업지(120), 상업지(130), 오락시설(140), 교통지(150), 공공장소(160), 발(220), 활엽수지(310), 침엽수지(320), 혼합지(330), 기타식생지(430), 나지(620)

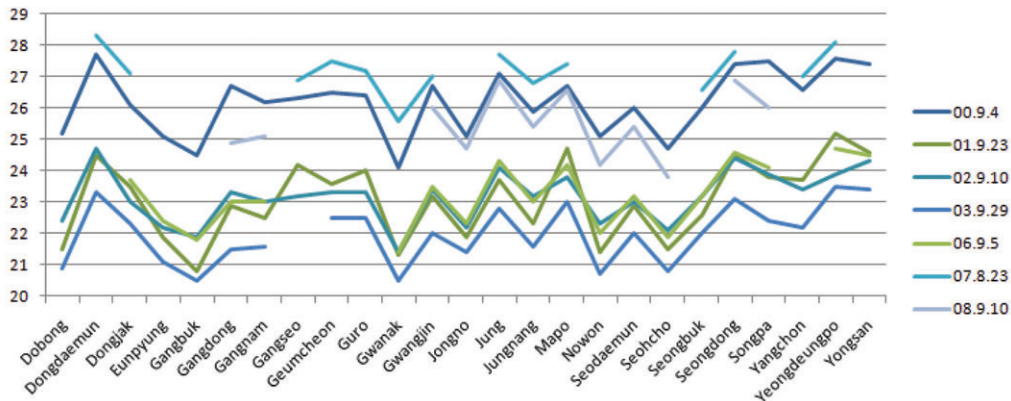


그림 2 연도별 여름철 서울의 각 구별 평균 지표온도

인공구조물과 나지의 방출률이 같다는 가정과 각 피복에서 같은 양의 태양복사열을 받는다는 가정을 할 때 도심지역에서의 토지의 이용도에 따른 지표온도의 변화는 용도에 의한 효과가 반영되고 있음을 나타낸다고 할 수 있다. 다시 말해, 도심지역의 복사열은 지표의 태양열의 흡수와 재복사만이 관여하는 것이 아니고 건물 자체에서 에너지 사용으로 인해 발산하는 열도 복사가 함께 일어날 수 있다는 것을 의미한다. 단순화를 위하여 나지와 혼합된 구조물의 방출률이 같다는 가정을 하고, 도심지역의 토지이용에 따른 나지와 온도 차이를 계산하였는데, 주거지역과 나지의 온도차를 보면, 영등포구의 경우, 거주 지역에서 약 6 °C 가량, 공업지역에서 2 °C 정도 나지에 비해 높게 나타나고 있다. 이러한 온도차를 에너지 사용으로 인한 열의 방출로 본다면, 도심지역에서 열섬효과를 증가시키는 원인은 건물에서 흡수한 태양열의 재복사 이외에도 인간의 에너지 사용으로 인한 열의 복사도 함께 일어난다고 가정할 수 있다. 이에 대해서는 서울시 전체를 대상으로 더 자세한 연구가 진행 중이다.

IV.1에서 예시한 지표온도가 높은 구들의 토지이용 상태를 살펴보면, 이들 지역은 도시화 비율이 다른 곳 보다 훨씬 높은 지역들로 나타나고 있는데, 영등포구의 경우 총 면적의 41%가 거주 지역, 51%가 공업과 상업지역이고, 상대적으로 낮은 온도를 보이는 강북구는 총면적의 35.1%가 거주지역이고 6.3%가 상업 및 기타 도심화 지역으로 도심지역의

영향이 영등포구 보다 현저하게 낮다. 이는 거주지 뿐 아니라 공업과 상업지역이 몰려 있는 지역에서는 열섬현상이 더 크게 나타날 수 있다는 가능성을 함께 보여주고 있다. 그러므로 공업, 상업, 주거 지역에서 발산되는 복사열이 도시열섬현상에 주요한 인자로 작용하고 있음을 고려해야 한다는 것을 암시적으로 나타낸다. 또한 거주, 공업, 상업 지역 등 인간에 의한 에너지 소비에 좌우되는 지역에서의 지표온도는 에너지 소비 패턴에 따라 지표온도가 달라짐을 예상할 수 있었다.

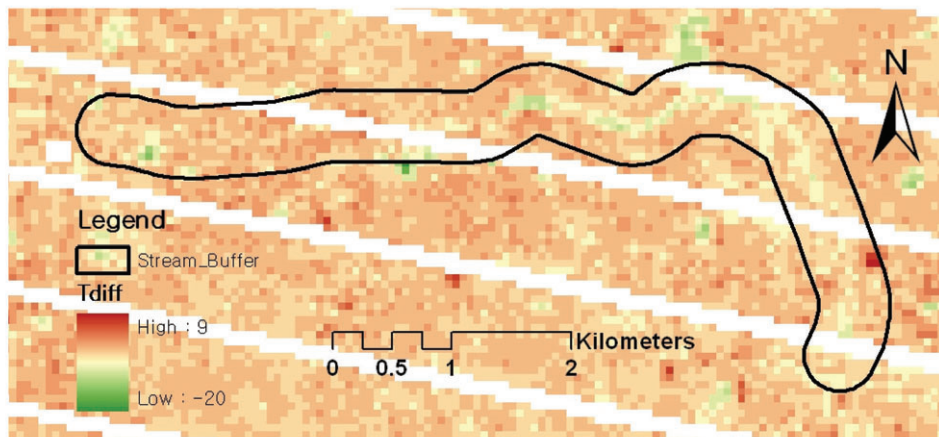
3. 청계천의 복원이 도시열섬현상에 영향

도심지역의 지표온도가 열섬효과에 미치는 영향은 이미 잘 알려진 사실이다. 서울에는 이러한 효과를 유추, 관찰할 수 있는 것이 있는데, 청계천이 바로 그것이다. 서울시(2006)와 허영일(2006)의 연구에 의하면, 청계천 주위의 기온이 청계천의 복원으로 낮아졌다는 보고가 있었다. 또한 청계천의 복원으로 바람길이 형성되어 청계천을 통하여 더 많은 바람이 지나게 되었다고 한다. 이러한 연구는 청계천 주위의 바람과 기온 등의 기상 요소에 의한 분석에 근거를 하였고, 복원에 의한 효과에 대한 직접적인 원인을 설명하기는 다소 결점들이 있다. 본 연구에서는 이에 추가적으로 지표온도에 대한 영향을 함께 검토하였다.

청계천의 복원 전과 후의 하천을 따라 분포하는 지표의 온도를 구별하기 위해 Landsat의 위성영상

을 사용하였다. 그림 3a는 2002년 9월 10일과 2008년 9월 10일의 온도적외선 영상을 통한 지표 온도의 차를 나타낸다. 굵어진 선형의 테두리 안에 보이는 노란빛과 연두색 빛은 청계천의 온도를 나타내는데, 우측 상단에서 뚜렷한 온도차(연한 연두색과 흰색 부분)를 보이고 있다. 전체적으로 2008년 9월 10일의 지표온도는 2002년 9월 10일의 지표온도보다 높게 나타났다. 청계천의 상류부분은 개천의 폭이 5~15 m 정도의 폭을 가지고 있어서 화소 하나의 실거리가 60 m인 Landsat 위성 적외선 온도영상으로는 판독이 어렵다. 하지만 이보다 넓은 개천 폭(30 m 이상)을 가지는 중류와 하류지

역은 뚜렷하게 변화를 관찰할 수 있었다. 그림 3b와 그림 3d 그리고 그림 3c와 그림 3e를 비교하면 중류 부분에서 청계천을 복원하기 전에 비해 복원 후 더 확실한 청색 선이 그려져 있음이 나타난다. 또한 청계천을 따라 추출한 청계천 온도의 평균값은 복원 이전인 2002년 9월 10일에는 $25.2 \pm 1.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 이후인 2008년 9월 10일에는 $24.8 \pm 1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 지표온도가 복원 이후 내려갔음을 확인할 수 있었다. 다시 말해, 청계천 복원 이후에 평균 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 하강한 것으로 나타났다. 이에 기초한 청계천의 온도의 영향은 열섬효과에 미치는 영향이 극히 미미할 것으로 판단된다. 하지만 서울 전체의 지표평균온도를



(a) 지표온도차 (2008/09/10 - 2002/09/10)

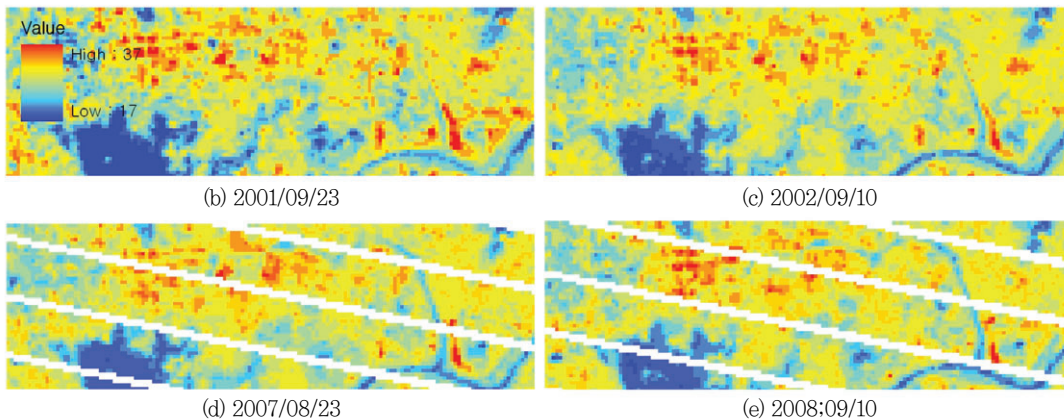


그림 3. (a) 청계천의 지표온도차(2008/09/10 - 2002/09/10)를 나타냄. 검정색선은 청계천 주위를 나타내는 경계선이고 그 중앙부분의 연녹색과 노란색이 청계천의 두 시간 사이의 온도차를 나타내고 있음. (c)~(d)는 청계천 복원전(b, c)과 복원 후(d, e)의 위성영상을 보여주는데 (d)와 (e)가 (b)와 (c)에 비하여 청계천을 따라 온도가 확연히 드러남을 관찰할 수 있음.

비교해 보면, 2002년 9월 10일에서 2008년 9월 10일 뺀 평균지표온도의 차가 2.3 °C로 2008년이 평균적으로 높은 지표온도 분포를 보인다는 것을 고려하면, 0.4 °C의 하강은 추측 이상의 영향을 미치고 있다고 판단할 수 있다. 또한 60 m 해상도를 가진 Landsat의 온도영상 화소에는 순수한 물만의 온도가 아니라 주변의 다른 콘크리트 등의 물질의 온도를 포함하고 있다. 이에 실제 청계천의 복원에 의해 나타나는 지표온도의 저감 효과는 이보다 클 것으로 기대할 수 있다. 그러므로 청계천의 지표온도의 저감은 가까운 주변 지역에 기온을 낮추는 효과를 주고 있을 것으로 판단할 수 있다.

V. 결론

Landsat 영상을 사용하여 서울 도심지역 피복과 토지이용에 따른 지표 온도분포와 청계천의 복원으로 인해 기온에 미치는 영향에 대하여 관찰해 보았다.

토지피복(LC)에 따른 지표온도는 기존의 연구에서와 같이 도시화된 정도에 비례하여 온도가 높게 관찰되는 특성을 나타냈다. 특히, 영등포구, 동대문구, 용산구 등 거의 대부분의 토지피복이 도시화된 지역은 지표의 온도가 매우 높게 나타났다.

토지이용(LU)에 따른 지표온도분포에서도 역시 주목할 만한 결과들이 관찰되었는데, 특히, 주거, 공장과 상업지역이 뚜렷한 차이를 보여주었다. 환경부의 토지피복세분류도의 중분류를 기준으로 만들어진 토지이용도를 이용하였는데, 도심화가 매우 높은 지역(영등포구)에서는 주거지역이, 녹지가 상대적으로 많은 지역(강북구)에서는 공장과 상업지역이 가장 높은 지표온도를 보여 주었다. 또한 모든 지표 복사열에 관련된 조건들이 동일하다고 가정하고 순수한 태양 복사열의 지표 재복사를 제외한 인간의 활동에 의한 복사열을 계산한 결과 도심지역에서 6 °C 이하 2 °C 이상의 차이를 보였다. 이는 인간의 활동 또는 에너지 사용 형태에 지표온도가 영향을 받고 있음을 나타낸다. 또한 청계천 주변지역의 지표온도를 관찰한 결과, 청계천의 복원은 청계

천을 따라 상당히 지표온도를 저감 시키고 있음을 관찰하였다.

참고문헌

- 기상청, 2009, 기후변화의 이해 III - 서울의 기후 변화.
- 서울특별시, 2007, 서울의 환경.
- 장영기, 김정욱, 1991, 서울지역의 도시열섬현상과 대기오염도의 관계에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(1), 49-53.
- 허영일, 2006, 청계천 복원에 따른 도시대기환경 개선효과에 관한 연구, 시립대학교 공학석사학위논문.
- Atwater, M. A., 1972, Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer: a numerical study, *Boundary-Layer Meteorology*, 3, 229-245.
- Bhang, K. J. and Park, S. S., 2009, Evaluation of the surface temperature variation with surface settings on the urban heat island in Seoul, South Korea using Landsat-7 ETM+ and SPOT, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(4), 708-712.
- Carnahan, W. H. and Larson, R. C., 1990, An analysis of an urban heat sink, *Remote Sensing of Environment*, 33, 65-71.
- Chavez, P. S. Jr., 1996, Image-based atmospheric corrections - Revisited and improved, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- Gallo, K. P., Tarpley, J. D., McNab, A. L., and Karl, T. R., 1995, Assessment of urban heat islands: a satellite perspective, *Atmospheric Research*, 37, 37-43.
- Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown,

- J. F., Hood, J. J., and Tarpley, J. D., 1993, The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect, *Journal of Applied Meteorology*, 32, 899-908.
- Gallo, K. P. and Owen, T. W., 1998, Assessment of urban heat island: a multi-sensor perspective for the Dallas-Ft. Worth, USA region, *Geocarto International*, 13, 35-41.
- Lillesand, M. T., Kiefer, R. W., and Chipman, J. W., 2008, *Remote Sensing and Image Interpretation* 6th ed, John Wiley & Sons, 568-572.
- Kim, Y. and Baik, J., 2002, Maximum urban heat island intensity in Seoul, *J. Appl. Meteor.*, 41, 651-659.
- Klysik, K. and Fortuniak, K., 1999, Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland, *Atmos. Environ.*, 33, 3885-3895.
- Landsberg, H. E., 1956 and The climate of towns. Man's Role in changing the Face of the Earth. W.L. Thosa Jr., Ed. The University of Chicago Press, 584-606.
- Li, J. Wang, X. Wang, X. Ma, W., and Zhang, H., 2009. Remote sensing evaluation of urban heat island and its spatial pattern of the Shanghai metropolitan area, China, *Ecological Complexity*, 6, 413-420.
- Lo, C. P., Quattrochi, D. A., and Luvall, J. C., 1997, Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect, *International Journal of Remote Sensing*, 18(2), 287-304.
- Montavez, J. P., Rodriguez, A., and Jimenez, J. I., 2000, A study of the urban heat island of Granada, *Int. J. Climatol.*, 20, 899-911.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration), 2008. *Landsat Science Data Users Handbook*.
- Nichol, J. E., 1994, A GIS-based approach to microclimate monitoring in Singapore's high-rise housing estates, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, 1225-1232.
- Oke, T. R., 1982, The energetic basis of the urban heat island, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 108, 1-24.
- Owen, T. W., Carlson, T. N., and Gillies, R. R., 1998, An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization, *International Journal of Remote Sensing*, 19, 1663-1681.
- Roth, M. and Oke, T. R., 1989, Emery, W.J. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology, *International Journal of Remote Sensing*, 10(11), 1699-1720.
- Stathopoulou, M. and Cartalis, C., 2007, Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corin land cover data: An application to major cities in Greece, *Solar Energy*, 81, 358-368, doi:10.1016/j.solener.2006.06.014.
- Stathopoulou, M. and Cartalis, C., 2009, Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation, *Remote Sensing of Environment*, 113,

- 2592-2605.
- Sobrino, J. A. and Raissouni, N., 2000, Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco, *Int. J. Remote Sensing*, 21(2), 353-366.
- Sobrino, J. A., Raissouni, N., and Li, Z., 2001, A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data, *Remote Sensing of Environment*, 75, 256-266.
- Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C., and Paolini, L., 2004, Land surface temperature retrieval from Landsat TM
5. *Remote Sensing of Environment*, 90, 434-440, doi:10.1016/j.rse.2004.02.003.
- Yague, C., Zurita, E., and Martinez, A., 1991, Statistical analysis of the Madrid urban heat island, *Atmos. Environ.*, 25B, 327-332.
- Weng, Q., Lu, D., and Schubring, J., 2004, Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*. 89, 467-483.

최종원고채택 10. 07. 30