도시지역의 토지피복유형이 지표면온도에 미치는 영향: 경기도 일산 신도시를 중심으로

김현옥[†] · 엄종민

한국항공우주연구원 위성정보연구센터

Effect of the Urban Land Cover Types on the Surface Temperature: Case Study of Ilsan New City

Hyun Ok Kim[†] and Jong Min Yeom

Korea Aerospace Research Institute, Satellite Information Research Center

Abstract : The physical environment of urban areas covered mostly by concrete and asphalt is the main cause of the urban heat island effect, primarily becoming apparent through increased land surface temperature. This study examined the effect of different urban land cover types on the land surface temperature using MODIS, Landsat ETM+ and RapidEye satellite data. As a result, the remote sensing based land surface temperature showed a marked difference according to the land use pattern in the case study of Ilsan new city. The high-rise apartment residential districts with less building-to-land ratio and higher green area ratio revealed lower land surface temperature than the low-story single-family housing districts characterized by relatively high building-to-land ratio and low green area ratio. From the view of climate zone and land cover types, there is a strong linear correlation between the impervious land cover ratio and the land surface temperature; the land surface temperature increases as the impervious built-up areas expand. In contrast, vegetation, water and shadow areas affect the decrease of land surface temperature. There is also a negative (-) correlation between NDVI and land surface temperature but the seasonal variation of NDVI can be hardly corrected.

Key Words : Land surface temperature (LST), land cover type, urban heat island, NDVI, MODIS, Landsat ETM+, RapidEye

요약 : 콘크리트와 아스팔트가 상당 부분을 차지하는 도시의 물리적인 환경은 도시열섬효과를 일으키는 주요 원인이며, 일차적으로 토지이용 또는 토양피복에 따른 지표면온도의 상승으로 나타난다. 본 연구에서는 도시의 토지피복유형이 지표면온도에 미치는 영향을 공간해상도가 다른 MODIS, Landsat ETM+과 RapidEye 위성영상을 사용하여 비교 분석해 보았다. 연구대상지인 일산 신도시지역의 지표면온도는 토지이용에 따라 뚜렷이 구분되는 패턴을 보여주었는데 건폐율이 높은 저층단독주택지구보다 건폐율이 낮고 녹지율이 높은 고층 아파트단지의 지표면온도가 현저히 낮게 나타났다. 토지피복유형과의 관계는 건물이나 도

접수일(2012년 2월 27일), 수정일(1차 : 2012년 3월 14일), 게재확정일(2012년 4월 1일).

[†] 교신저자: 김현옥(hokim@kari.re.kr)

로 등 도시화지역의 면적이 증가할수록 기후존의 지표면온도가 증가하고, 식생과 수면, 그림자 지역의 면적이 늘어날수록 지표면온도는 떨어진다. NDVI와 지표면온도 사이에도 음의 선형상관관계가 나타나지만, 계절적 영향을 배제하기 어렵다는 단점이 있다.

1. 서론

도시를 규정짓는 가장 뚜렷한 물리적인 특징은 인위적인 토지피복이다. 도시개발로 인하여 산림이나 경작지 등 녹지공간의 면적은 감소하는 반면, 건물과 도로, 보도블록 등 인공포장면이 차지하는 비율은 현저히 높아진다. 도시지역 인공지물의 상당부분을 차지하는 아스팔트나 콘크리트 포장면은 알베도(Albedo)가 낮아 많은 양의 태양복사 에너지를 흡수함으로써 지표 부근의 열에너지를 점차적으로 누적시키는 효과를 가져온다. 게다가 대부분의 인공포장재는 함수기능이 없기 때문에 하부의 자연토양에서 발생하는 수분증발을 막고 물순환을 차단하여 상단부 공기를 건조하게 만든다. 이러한 도시 환경에서는 잠열 변화가 낮기 때문에 현열이 증가하게 되어 최종적으로 도시열섬효과로 이어진다. 이 밖에도 도시열섬현상을 일으키는 원인으로 자동차의 배기가스, 도시산업시설에서 배출되는 대기오염물질, 고층·고밀 건축에 인한 열전도율이나 에너지 순환체계의 변화, 냉·난방기에 의한 배출열 등 각종 인공열을 들 수 있다(Owen *et al.*, 1998; 박민호, 2001).

도시열섬현상은 세 가지 관점에서 바라볼 수 있다. 지표면 열섬(surface urban heat island), 캐노피층 열섬(canopy layer heat island), 경계층 열섬(boundary layer heat island)이 그것이다. 캐노피층 열섬은 지표면으로부터 대략 건물의 평균 높이까지 발생하며, 경계층 열섬은 캐노피층 보다 위에 위치한다. 캐노피층 열섬과 경계층 열섬 현상은 대기의 실측자료를 중심으로 분석이 가능하고, 지표면 도시열섬 분석에는 원격탐사 방법이 유용하다. Voogt and Oke(2003)는 도시열섬 연구의 최근 동향을 도시의 공간구조와 열패턴 및 지표면 특성과의 관계 연구, 대기 열섬과 지표면 열섬과의 관계 연구, 도시 지표면에서의 일어나는 열에너지 기작과 도시대기모델의 연계 연구의 세 가지로 분류하였다. 본 연구는 도시지표면온도와 토지피복과의 관계 규명을 중심으로 도시지표면열섬현상을 다루고자 한다.

도시열섬현상을 분석하는 원격탐사 연구의 주요 내

용은 도시기후상태를 추정하는 주요 지표로서 정규식생지수(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)의 활용에 있다. Gallo *et al.*(1993)는 도시와 외곽에서 NDVI와 지표면온도에 명백한 차이가 나타남을 분석함으로써 도시의 물리적 환경이 도시열섬에 영향을 미친다는 것을 밝혀냈고, Lo *et al.*(1997)은 토지피복유형별로 낮과 밤에 열밴드의 반응이 달라지는 것은 토지피복에 따른 반사도와 식생의 양 사이에 일정한 상관관계가 있기 때문이라는 것을 ATLAS(Advanced Thermal and Land Applications Sensor) 자료에서 추출된 NDVI를 사용하여 증명하였다. Gallo and Owen(1999)은 계절별 기온과 NDVI의 특성을 고려할 때 NDVI값과 위성영상에서 산출된 지표면온도의 차이는 도시와 외곽지역의 온도차이를 40% 정도 범위 내에서 설명할 수 있다고 하였다. 이광재와 조명희(2006)은 우리나라 대도시의 지표면온도 분포특성을 연구하면서 지표면온도와 NDVI사이에 선형회귀식이 성립할 수 있다고 하였다.

도시열섬에서 식생이 중요한 이유는 대기 중의 수분을 증발시키고, 직접적으로 태양열을 흡수하여 기온을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 그늘을 만들어 태양에너지가 지표면을 가열하는 것을 막아주는 등 주변의 미기후를 개선하는 효과가 있기 때문이다(조현길과 野島義照, 2000). 한 화소 또는 일정 공간범위 내에서 정규식생지수가 높다는 것은 그 공간범위 내에서 식생이 차지하는 영향력이 크다는 것이며, 상대적으로 비식생지역 즉, 건물이나 도로 등 불투수토지피복으로 인한 영향이 낮아진다는 것이다. 그러나 이러한 접근법의 문제는 식생의 생장주기에 따른 계절적 영향이 심하다는 것이며, 이에 대한 해결책으로 Weng *et al.*(2004)는 정규식생지수 대신 화소당 식생비율(vegetation fraction)을 사용할 것을 제안하였다. Yuan and Bauer(2007)의 연구에서도 NDVI보다 불투수토지피복된 면적비율이 지표면온도와 더 강한 선형상관관계가 있다고 하였다.

도시의 복잡 다양한 토지피복 특성을 명확히 구분하기 어려웠던 중·저해상도 위성영상과 달리 근래에는

다양한 분광센서와 1 m 미만의 높은 공간해상도를 가지는 상업용 인공위성들이 개발되면서 도시분야에서도 원격탐사의 활용영역이 급속히 확대되고 있다. 즉, 도시열섬 연구에 있어서도 도시의 토지피복유형이 지표면온도에 미치는 영향을 고해상도 위성영상을 이용하여 도시공간구조나 토지피복과의 관계를 중심으로 보다 구체적으로 살펴볼 수 있게 되었다. 본 연구에서는 도시지표면온도와 토지피복과의 관계를 공간해상도가 다른 MODIS (MODerated Resolution Imaging Spectroradiometer), Landsat ETM+(Enhanced Thematic Mapper Plus) 과 RapidEye 위성영상을 사용하여 비교 분석해 보고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

1) 연구대상지

일산 신도시는 서울 중심부에서 북서쪽으로 약 20 km 떨어진 곳에 위치하고 있으며, 행정구역상 경기도 고양시 일산동구와 일산서구에 속한다(Fig. 1). 1980년대 후반 200만호 주택건설정책에 의해 추진된 대규모 도시건설사업의 일환으로 조성되었으며, 토지이용 측면에서 주엽과 마두 지하철역을 중심으로 대규모 아파트 단지가 조성되었고, 정발산을 중심으로 단독주택지구

조성되었다. 생활권 위계를 고려하여 중심상업지역은 신도시지구 도심부에 배치하고 일반상업지역은 전철역사 주변에 배치하였다. 쾌적한 주거환경을 조성하고자 도시 중심부에 정발산 근린공원과 국내 최대규모의 호수공원을 포함하여 18개 근린공원, 39개소의 어린이공원 등 다양한 형태의 녹지를 조성하였으며, 녹지율이 신도시 총 사업면적의 25%에 이른다(박성영, 1997).

연구대상지로서 일산신도시 일대는 평탄하기 때문에 지형적 특성이 도시열섬효과에 미치는 영향이 거의 없고, 아파트 단지구획이나 토지이용이 계획적으로 이루어져 도시블록별 그 특성이 명확하게 구분되기 때문에 도시 내 토지이용 또는 토지피복유형과 지표면온도와와의 관계를 규명하는데 유리한 조건을 갖추고 있다.

2) 연구방법

본 연구에 사용된 인공위성 영상자료는 MODIS LST(Land Surface Temperature) Level-2 product, Landsat ETM+와 RapidEye 다중분광영상의 세 가지이고, 각각의 특성은 Table 1과 같다.

(1) 영상의 전처리

연구에 사용된 위성영상들은 우리나라 표준좌표계(TM GRS80)에 맞춰 정사 보정되었으며, 6S(Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) 모델을 이용하여 대기보정 하였다

Fig. 1. Study area, Ilsan New City.

Table 1. The detailed characteristics of satellite data used in this study

	MODIS LST L2 Products	Landsat ETM+	RapidEye
Spatial Resolution	1km(TIR ¹)	30m(MS ²), 60m(TIR ¹),	6.5m(MS ²)
Spectral Bands	Band 31(10780-11280 nm) Band 32(11770-12270 nm)	Blue 450-515(nm) Green 525-605(nm) Red 630-690(nm) NIR ³ 750-900(nm) TIR ¹ 10400-12500(nm)	Blue 440-510(nm) Green 520-590(nm) Red 630-685(nm) RedEdge 690-730(nm) NIR 760-850(nm)
Swath Width	2330 km	185 km	77 km
Revisit Time	Daily	16 days	5.5 days
Orbit Altitude	705 km	705 km	630 km
Acquisition Date and Time	2011/5/14 10:09 LTC ⁴ 2011/9/22 11:06 LTC ⁴	2011/5/14 10:30 LTC ⁴	2011/9/22 12:24 LTC ⁴

¹: Thermal InfraRed Band²: Multi Spectral Band³: Near InfraRed Band⁴: Local Time Clock

(Vermote *et al.*, 1997). 단, MODIS LST 자료는 모든 전처리 과정을 거쳐 만들어진 최종 산출물이기 때문에 따로 보정을 수행하지는 않았다. 일반적으로 다중분광 영상의 경우, 가시광 영역의 분광값은 짧은 파장의 특성상 대기의 영향을 많이 때문에 정확한 지면정보를 추출하기 위해서는 대기 관련 시그널을 제거해야 한다. 6S 복사전달모델에서는 다양한 대기 특성을 반영할 수 있도록 입력자료를 결정하도록 하고 있는데 본 연구에서는 6S에 내장된 US 중위도 표준대기 모델을 사용하였다. 우리나라에 최적화된 대기모델이 없기도 하지만, 본 연구의 목적이 정확한 지표면 물리값을 산출하는데 있는 것이 아니라 대기효과가 일정부분 제거된 지표면의 공간특성을 보고자 하는데 있기 때문이다. 그리고 에어로졸 효과를 보정하기 위해서는 8가지 에어로졸 모델 중 도시환경의 특성을 반영할 수 있도록 도시모델을 적용하였다.

(2) 지표면온도 산출

본 연구에서는 도시지역의 토지피복유형이 지표면온도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 열밴드를 가지고 있는 Landsat ETM+와 공간해상도가 상대적으로 높은 RapidEye 위성영상을 비교하기로 한다. 그러나 본 연구에서 활용할 수 있는 Landsat ETM+와 RapidEye 위성영상은 촬영시점이 다르다(Table 1). 일산지역을 촬영한 2011년 Landsat ETM+ 영상 중 SLC-off(Scan Line Corrector Failure) 문제로 연구대상지역을 한꺼

번에 커버하는 영상은 5월 14일 촬영된 것뿐이고, 사용 가능한 RapidEye 영상은 9월 22일 촬영된 것이다. 따라서, 본 연구는 연구대상지의 정확한 지표면온도 산출에 관심을 두는 것이 아니라 상대적으로 높고 낮은 도시 지표면온도의 패턴이 5월과 9월에 유사한 양상을 보인다는 전제 하에 고해상도 RapidEye 영상을 활용하여 분류한 토지피복유형과의 상관관계를 분석하고자 한다. 봄과 가을의 기온이 유사한 우리나라의 기후 특성을 고려할 때 5월과 9월의 도시지표면온도가 유사한 경향일 것이라고 추측되지만, 실제 두 시점의 도시지표면온도 공간패턴이 유사하게 나타나는지를 확인하기 위하여 매일 촬영이 가능한 MODIS 위성의 LST 최종산출물 자료를 비교하였다. 참고로 일산신도시에서 가장 가까운 기상청 서울관측소의 자료에 의하면, Landsat ETM+ 영상이 촬영된 5월 14일의 최저기온은 12.1 °C, 최고기온 22.9 °C, 평균기온 17.2 °C 이고, RapidEye 영상이 촬영된 9월 22일의 기온은 최저 11.9 °C, 최고 24.6 °C, 평균 18.1 °C 이다.

그리고 Landsat ETM+ 영상을 이용하여 지표면온도를 산출하였다. 이 때 사용된 열밴드는 다른 분광밴드와 다르게 60 m의 공간해상도를 갖는다. 지금까지 Landsat TM이나 Landsat ETM+의 열밴드를 활용한 지표면온도 산출방법은 크게 세가지로 구분할 수 있다: 1) 복사전달방정식(Radiative transfer equation), 2) Qin *et al.*(2001)에 의한 mono-window 알고리즘, 3)

Jimenez-Munoz and Sobrino 알고리즘(Sobrino *et al.*, 2004). 이 중 첫 번째 방법은 위성이 지나가는 패스를 따라 실시간 현장 관측한 값을 요구하기 때문에 사용이 제한적이고, 두 번째와 세 번째 방법이 일반적으로 많이 쓰인다. 본 연구에서는 이 두 가지 알고리즘을 지원하도록 Zhang *et al.*(2006)에 의해 개발된 프로그램을 이용하여 지표면온도를 계산하였다. 지표면온도를 계산하는 과정은 크게 네 단계로 이루어진다. (1) 위성의 열밴드 센서에서 관측된 DN(Digital Number) 값을 검정계수를 이용하여 대기 상단에서의 센서복사량(at-sensor radiance)으로 변환하고, 산출된 복사량에서 역 플랑크 함수를 이용하여 대기상층부의 밝기 온도(top-of-atmospheric brightness temperature)를 구한다. 대기 상층부의 밝기 온도에서(2) 대기에 의한 흡수와 재방출을 보정하고, (3) 지표면에서의 방출, (4) 지표면의 거칠기에 대한 보정작업을 통해 지표면온도(LST: Land Surface Temperature)가 최종적으로 구해진다. 두 번째에서 네 번째 단계에 해당하는 일련의 보정작업은 상당히 복잡하게 이루어지는데 Qin *et al.*(2001)에 의한 mono-window 알고리즘이나 Jimenez-Munoz and Sobrino 알고리즘은 이 과정을 간략화 시킨 것이

다. Zhang *et al.*(2006)의 프로그램에서는 두 가지 알고리즘을 모두 지원하며, 지표방출율을 보정하기 위하여 분류(classification) 이미지를 사용하거나 정규식생 지수(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index), 또는 식생과 나지의 비율을 사용하는 세가지 방법을 지원한다. 본 연구에서는 NDVI값을 이용하여 지표방출율을 추정하였으며, Jimenez-Munoz and Sobrino 알고리즘을 적용하였다.

(3) 토지피복분류

RapidEye 영상을 이용하여 토지피복을 분류한 방법은 Fig. 2와 같다.

도시지역은 다양한 건물과 포장재, 도시 및 녹지시설 등이 복잡하게 얹혀있어 공간해상도가 높아질수록 화소 기반의 분류방법을 사용하는 데 한계가 있다. 예를 들어, 동일한 객체 또는 토지피복유형이라 하더라도 그것을 이루는 여러 화소들 간에 분광편차가 크기 때문에 'Salt and Pepper Effect'와 같은 문제가 야기된다. 따라서, 본 연구에서는 토지피복분류를 위하여 eCognition Developer(version 8.0)를 사용한 객체기반의 방법을 적용하였다. 객체기반의 분류에서 가장 기본이 되는 것

Fig. 2. The procedure of land cover classification using object-based approach with RapidEye satellite image data.

Table 2. Attributes derived from Landsat ETM+ and RapidEye data

Attributes	Calculation Methods
NDVI derived from Landsat ETM+	$(\text{Band4} - \text{Band3}) / (\text{Band4} + \text{Band3})$
Albedo derived from Landsat ETM+ by Liang and Chen(2002)	$(0.356 \times \text{Band1}) + (0.13 \times \text{Band3}) + (0.373 \times \text{Band4}) + (0.085 \times \text{Band5}) + (0.072 \times \text{Band7})$
NDVI derived from RapidEye	$(\text{Band5} - \text{Band3}) / (\text{Band5} + \text{Band3})$
Relative area of 6 land cover types	Object-based classification into Built-up, road, shadow, bare soil, water, green

*Band n: Reflectance in multispectral band

은 개별 화소들을 유사한 그룹 또는 하나의 동일한 객체로 만들어 주는 과정 즉, 세그멘테이션(Segmentation)인데 eCognition Developer(version 8.0)에서는 다양한 방법의 세그멘테이션 알고리즘이 지원된다.

RapidEye 원영상을 대기보정한 후 식생과 비식생지역의 분광특성이 보다 뚜렷이 구분되는 특성이 관찰되었다. 레일리 산란과 같은 대기의 영향을 상대적으로 많이 받는 가시광 영역의 분광반사값이 보정됨으로써 적색 파장의 반사도가 감소하였기 때문에 근적외 영역의 분광값과의 차이가 상대적으로 늘어난 데 따른 것으로 보인다. 결과적으로 대기보정이 수행된 NDVI 경계값을 이용하여 어렵지 않게 식생지역과 비식생지역으로 세그멘테이션 할 수 있었다. 식생지역은 산림과 농경지, 도시내 공원이나 아파트단지 내 조경식재지 등을 포함한다. 비식생지역에 대해서는 스케일 파라미터와 shape/color, smoothness/compactness의 두 가지 동질성 기준을 사용하는 multi-resolution 세그멘테이션을 수행하였다. 비식생 세그먼트 중 학교운동장이나 건설현장, 휴경상태인 경작지 등 나지는 청색과 적색 파장대의 비(Ratio)에 의해 뚜렷이 구분되는 특징을 보였다. 그림자 지역도 전체 분광영역에서 대체로 가장 낮은 반사율을 보이기 때문에 쉽게 분류가 가능했지만 수면과는 쉽게 구별이 되지 않았다. 그러나 Green NDVI (Hansen and Schjoerring, 2003)¹⁾에서 그림자와 수면의 구분이 뚜렷하게 나타났다. 나머지 지역은 도로와 주차장, 건물 등 대부분이 인공포장된 도시화지역으로 분광특성만으로는 구분이 어렵다. 그 중 도로는 도시화지역의 다른 세그먼트들과 다르게 직선에 가깝게 가늘고 긴 형태로 나타나기 때문에 몇 가지 형태지수를 사용하여 구분할 수 있었다. 도로를 제외하고 미분류된 나머지 지역은 대부분이 불투수토지피복이므로 건축지역으로 최종 분류하였다.

(4) 기후존 생성 및 영상기반의 속성값 산출

Landsat ETM+에서 화소 단위로 산출된 지표면온도 영상에 세그멘테이션 기법을 적용하여 기후존(climate zone)을 생성하였다. 기후존과 토양피복 특성과의 관계를 분석하기 위하여 Landsat ETM+과 RapidEye 위성영상으로부터 몇 가지 속성정보를 추출하였다. Landsat ETM+에서 NDVI와 알베도(Albedo)를 계산하고, RapidEye에서 NDVI와 토지피복유형별 면적비율을 산출하였다. 토지피복유형은 건축지역, 도로, 그림자, 나지, 물, 녹지의 여섯 개 카테고리이다. 각각의 산출방법은 Table 2에 제시된 바와 같다.

3. 연구결과

1) RapidEye를 이용한 토지피복유형 분류결과

RapidEye 다중분광 위성영상을 이용하여 건축지역, 도로, 그림자, 나지, 수면, 녹지의 여섯 개 클래스로 분류한 결과는 Fig. 3과 같다. 분류정확도는 층화추출법(stratified random sampling)으로 선택된 100개 기준점에 대하여 RapidEye 원영상과 네이버 지도포털에서 서비스하는 항공사진을 참조하여 판독하였다. 전체분류정확도는 85%(Kappa 0.81)이고, 각 항목별 분류정확도는 Table 3과 같다. 인공포장재에 의한 불투수 토지피복이라는 관점에서 건축지역과 도로지역을 도시화지역이라는 하나의 카테고리로 묶으면 분류정확도는 92%로 증가한다.

1) Green NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) = $(\text{NIR} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green})$

Table 3. Land cover classification accuracy

Classified Data	Reference Data						User's Accuracy
	Vegetation	Shadow	Ground	Built-up	Water	Road	
Vegetation	26	0	0	0	0	0	100.00%
Shadow	0	9	0	0	1	0	90.00%
Ground	0	0	10	1	0	0	90.91%
Built-up	4	0	0	17	1	3	68.00%
Water	0	0	0	0	13	0	100.00%
Road	0	1	0	4	0	10	66.67%
Producer's Accuracy	86.67%	90.00%	100.00%	77.27%	86.67%	76.92%	

Overall Classification Accuracy = 85.00%

Overall Kappa Statistics = 0.8141

Fig. 3. Land cover classification with RapidEye satellite data(left: original imagery with true color composition, right: classification result).

2) MODIS LST를 이용한 5월과 9월의 지표면온도 비교

MODIS LST에 의한 5월 14일과 9월 22일 일산지역 일대의 지표면 온도를 비교하였다. 공간해상도가 1 km로 낮아서 연구지역 내의 토지이용이나 도시구조에 따른 정확한 지표면온도를 파악할 수는 없기 때문에 일산 신도시 지구를 포함하는 인근 지역에 대하여 대략적인 온도 분포 경향을 보고자 하였다. 비교 결과, 두 시점의 지표면온도는 유사한 공간 패턴을 띠다고 볼 수 있다. 동일한 공간범위 내에서 5월 영상의 지표면온도는 최저 20.7 °C에서 최고 31.4 °C까지 나타났고, 9월 영상에서는 최저 24.6 °C, 최고 29.3 °C로 변화 폭이 다소 줄어들었다. 두 영상 모두에서 신도시 개발지역이 주변의 산림이나 농경지보다 높은 온도를 띄고 있으며, 한강이 흐르는 수면의 온도가 눈에 띄게 낮다. Fig. 4는 9월과 5

Fig. 4. Difference of MODIS land surface temperature between Sep. 22, 2011 and May 14, 2011.

월의 지표면온도 차이를 보여주는 영상으로 우측상단의 파란색 부분이 일산 신도시 지역이다. 개발지 주변의 농경지는 5월에 아직 이앙을 하지 않아 나지 상태이고 수

Fig. 5. Climate zone displayed on the RapidEye imagery(RGB) and land surface temperature($^{\circ}\text{C}$) retrieved from Landsat ETM+.

확을 하기 전인 9월에는 식생으로 피복되어 있다는 점을 감안하여야 하는데 5월의 지표면온도가 1°C 미만 범위 내에서 9월보다 다소 높게 나타난다. 반면, 한강 수면은 9월 영상에서 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 정도 더 높은 것으로 관찰되었다. 그리고 일산신도시지구와 인근 도시화지역에서는 두 시점의 지표면온도 차이가 3°C 정도로 상대적으로 크게 나타났다. 온도차이 값이 도시화지역 전반에 동일한 정도로 나타나는 것으로 보아 9월 영상에서 지표면온도 값이 전반적으로 낮게 계산된 것으로 보인다. 즉, 5월과 9월의 도시지표면온도는 일산신도시지역 내에서 유사한 양상을 보인다고 전제하고 Landsat ETM+와 RapidEye를 비교하는 다음 단계의 분석을 진행할 수 있다.

3) 지표면온도와 도시공간구조

Landsat ETM+의 열밴드를 이용하여 화소단위의 지표면온도를 산출한 결과는 Fig. 5(우)와 같다. MODIS LST와 비교하여 전체적으로 값이 높지만, 본 연구에서는 도시지표면온도의 절대값보다 상대적인 경향을 보고자 하는데 의의가 있으므로 특별한 처리나 보정작업은 하지 않았다. 도시화지역의 경우, 도시블록별 토지이용 패턴에 따라 지표면온도의 차이가 뚜렷이 구분되는 것을 볼 수 있다. 특히, 일산신도시지구에서 고층아파트단지의 지표면온도가 $40\sim 42^{\circ}\text{C}$ 정도로 대략 47°C 의 온도를 나타내는 저층단독주택지에 비해 현격

히 낮다. 그리고 고층아파트단지를 통과하는 선형녹지와 도로를 따라 지표면온도는 평균 $36\sim 38^{\circ}\text{C}$ 정도로 주변에 비해 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 정도 낮아진다. 이는 공원에 식재된 조경수목과 가로수 등 식생에 의한 온도저감 효과로 볼 수 있다(Fig. 6a). 아파트단지의 경우, 고층건물에 의해 상시 그림자가 지는 음지가 생기게 마련이므로 이 또한 지표면온도를 낮추는 원인이라고 할 수 있을 것이다. 즉, 건폐율이 낮고 녹지율이 높은 고층 아파트단지가 건폐율이 높고 녹지율이 낮은 단독주택단지보다 도시지표면온도에 의한 열섬 효과가 적다는 것을 보여준다고 하겠다.

그밖에 정발산을 비롯한 산림지역과 호수공원 일대의 지표면온도가 두드러지게 낮음을 확인할 수 있었다(Fig. 6b). 산림과 공원녹지 지역의 지표면온도는 대략 $33\sim 34^{\circ}\text{C}$ 정도이며, 호수면은 조금 더 낮은 $30\sim 31^{\circ}\text{C}$ 정도이다. 반면, 킨텍스 건물지역과 일산 신도시 남단 장항동 산업단지의 경우는 지표면온도가 약 $55\sim 57^{\circ}\text{C}$ 로 주변에 비해 월등히 높다(Fig. 6c). 산업단지 지역은 식생이나 나지가 거의 없이 대부분 건물이나 주차장, 기타 포장재에 의한 불투수토지피복비율이 높기는 하지만, 불투수토지피복비율이 높은 다른 시가지지역과 비교해서도 현저히 지표면온도가 높게 나타나는 것은 산업단지내 건물의 대다수를 차지하고 있는 파란 지붕의 물리적 특성에 의한 영향으로 추측된다. 벼농사가 주를 이루는 주변 농경지의 경우, Landsat 영상이 촬영된 5

Fig. 6. RapidEye imagery(RGB) and land surface temperature(°C) retrieved from Landsat ETM+(a: near Juyeop3-dong, b: near Jeongbal-mountain and Ilсан lake park, c: near Janghang-dong industrial area).

Table 4. Correlation between LST and land cover attributes(NDVI, albedo, relative area of land cover types) at the level of climate zone

LST	Landsat ETM+		RapidEye							
	Albedo	NDVI	NDVI	Green	Built-up	Road	Urban (built-up + road)	shadow	Bare soil	water
Pearson correlation coefficient	.315**	-.647**	-.562**	-.562**	.724**	.298**	.766**	-.158**	-.033	-.406**
P-value	.005	.000	.000	.000	.000	.008	.000	.166	.773	.000

** : Correlation is significant at the level 0.01 level (2-tailed)

월은 아직 이앙이 되지 않은 시기이므로 나지에 의한 지표면온도라는 것을 감안할 필요가 있다. 대략 34~37 °C 정도로 나타난다.

4) 지표면온도와 토지피복유형

일산 신도시지구 내에서 생성된 78개의 기후존(Fig. 5(좌))을 단위로 하여 Landsat ETM+과 RapidEye 영상에서 추출된 평균지표면온도와 토지피복 속성 각각에 대한 상관관계를 SPSS(version 10) 통계프로그램을 이용하여 분석하였다(Table 4). 두 영상에서 공통으로 산

출된 NDVI의 경우, 5월의 Landsat ETM+에서 산출된 NDVI와 9월의 RapidEye에서 산출된 NDVI 값은 계절이 다르고 공간해상도가 다르다는 점을 감안해야 하지만, 그럼에도 불구하고 대체로 유사한 경향을 보인다. 9월 RapidEye 영상에서 NDVI값이 다소 높아지는데 그 차이는 평균 0.05 정도이다.

Landsat ETM+의 다중분광밴드는 30m 공간해상도로 도시지역의 상세한 토지피복분류가 어렵다. 따라서, 토지피복에 따른 태양복사에너지의 흡수 정도를 대표할 수 있는 알베도와 식생의 피복 정도를 가늠할 수 있는

Fig. 7. Scatterplots between LST and selected attributes.

NDVI를 중심으로 평균 지표면온도와 어떠한 관계가 있는지를 비교하였다. 통계분석 결과, 도시지표면온도와 알베도는 양의 상관관계가 있으며, NDVI와는 음의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 특히, NDVI는 값이 증가할수록 지표면온도가 떨어지는 선형관계가 성립한다 (Fig. 7).

고해상도 RapidEye 다중분광밴드에서 산출된 NDVI와 토지피복유형별 면적비율이 기후존의 평균 지표면온도와 상관관계가 있는지를 분석하였다. 여기서 주의할 점은 지표면온도는 5월의 Landsat ETM+영상에서 산출되었고 RapidEye 영상은 9월에 촬영되었기 때문에 토지피복 특히, 식생의 상태가 다를 수 있다는 것이다. 그러나 5월(이양진)과 9월(수확전)의 식생피복 상태가 확연히 차이가 나는 농경지와 달리, 도시화지역의 경우는 대부분의 녹지가 조경수목으로 식재되어 있기 때문에 5월이면 활엽수나 초본의 잎이 거의 다 나오는 시기이고 9월이면 아직 낙엽이 지지 않은 시기이므로 두 시기 모두 토지피복 중 식생의 특성이 반영되어져 있다고 볼 수 있을 것이다. 앞서서도 언급한 바와 같이 5월의 Landsat ETM+ 영상에서 산출한 NDVI값과 9월의 RapidEye 영상에서 산출한 NDVI 값은 대체로 유

사한 성향을 보여주었다. 단, 공간해상도가 1 km로 저해상도이기는 하지만 두 시점의 MODIS 지표면온도 자료에서도 볼 수 있듯이 어느 정도의 계절적 차이는 보여진다. 이러한 점을 고려하여, 지표면온도와 RapidEye의 NDVI, 그리고 토지피복유형별 면적비율은 절대적인 수치를 비교하기 보다 상대적인 관계를 보는데 역점을 두었다. 통계분석 결과, 기후존에서 건축지역이 차지하는 비율과 평균지표면온도 사이에 강한 선형관계가 나타났다. 그 다음으로 식생, 수면, 도로, 그림자, 나지의 순이다. 정리하자면, 유사한 기온분포를 보이는 기후존에서는 건물이나 도로 등 도시화지역의 면적이 증가할수록 지표면온도가 높아지고, 식생과 수면, 그림자는 지표면온도를 떨어뜨리는 효과를 가져온다. 참고로, 건축지역과 도로를 하나의 유형으로 합친 도시화지역의 면적비율은 지표면온도와 가장 강한 상관관계를 나타낸다. 주목할만한 것은 본 연구분석에서 기후존의 평균 NDVI와 식생면적비의 상관계수가 동일하게 나타났다는 것이다. 혹시 우연의 일치까 아닐까 하여 표본의 수를 조금씩 바꾸어 보아도 둘의 상관계수는 상당히 유사하게 나타난다. 도시화지역에서 건설현장을 제외한 대규모의 나지나 수면이 좀처럼 존재하지 않는 점을 감안한다면 지표면온도에 영향을 미치는 주요 토지피복유형은 크게 가로수나 조경녹지에 의한 식생지역과 식생이 아닌 지역 즉, 불투수토지피복의 두 가지 유형으로 구분할 수 있다. 즉, 도시화지역 면적비율의 증가에 따른 지표면온도의 상승은 식생면적의 증가에 따른 지표면온도의 감소라는 관계가 성립되고, 이러한 특성이 각 기후존의 평균 NDVI값에 잘 반영되어 나타나는 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 공간해상도와 분광특성이 다른 MODIS, Landsat ETM+와 RapidEye 위성영상을 이용하여 도시열섬현상의 주요 원인이 되는 지표면온도가 토지이용이나 토지피복과 어떻게 관련되는지를 보고자 하였다. MODIS LST 자료를 이용하여 5월과 9월의 일산 신도시 일대 지표면온도 패턴이 전체적으로 유사하다는 것을 확인하였고, Landsat ETM+의 열밴드를 이

용하여 지표면온도를 산출하고, RapidEye 영상과 비교함으로써 도시공간구조 및 토지피복특성과의 상관성을 분석하였다.

일산 신도시 지역의 지표면온도는 도시공간구조 또는 토지이용과 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 건폐율이 높은 저층주거단지보다 건폐율이 낮고 녹지율이 높은 고층아파트단지의 지표면온도가 뚜렷이 낮게 나타났으며, 가로수나 아파트 단지내 선형녹지를 따라 수목이 식재된 곳의 지표면온도가 확연히 떨어지는 것도 확인할 수 있었다. 지표면온도를 기준으로 형성된 기후존을 단위로 토지피복유형과의 관계를 분석한 결과, 건축지역 또는 도시화지역의 면적비율이 높아질수록 지표면온도가 증가하는 강한 선형관계를 확인할 수 있었다. 반대로 식생지역의 면적비율은 도시지표면온도와 음의 선형관계를 보였다. 식생지수 또한 지표면온도와 음의 상관관계를 보이며, 식생면적비율과 NDVI가 지표면온도에 미치는 영향은 상당히 유사한 패턴을 보인다.

본 연구에서는 기존 연구들에서 밝혀진 도시지표면온도와 NDVI의 상관성을 다시 한번 확인할 수 있었고, 세분화된 토지피복유형과 지표면온도와의 상관관계를 밝힐 수 있었다. 하지만, 지표면온도 산출에 사용된 Landsat ETM+ 영상과 토지피복 분류에 사용된 고해상도 RapidEye 영상의 촬영시점이 달라 정확한 상관관계를 도출하는 데는 다소 한계가 있었다. 향후 연구로서 일산신도시 지역의 시계열 영상을 확보하여 계절별 기온변화에 따른 NDVI 값의 변화를 연구한다면, 식생면적이나 녹지량이 도시지표면온도 또는 도시열섬현상에 미치는 영향을 보다 설득력있게 설명할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 박민호, 2001. Landsat TM 열적외 데이터를 이용한 도시열섬현상에 관한 연구 - 서울시를 대상으로, 대한토목학회논문집, 21(6-D): 861-874.
- 박성영, 1997. 신도시 개발 사례(II): 호수와 푸르름이 어우러져 정감이 서린 일산 신도시, 대한토목학회지, 45(5): 90-100.
- 이광재, 조명희, 2006. 공간정보기술을 활용한 도시지역 지표온도 분포 특성 해석, 대한원격탐사학회지, 20(6): 397-408.
- 조현길, 野島義照, 2000. 도시녹지의 미기후개선, CO2 흡수 및 화재방지의 효과, 한국자원식물학회지, 13(3): 162-170.
- Gallo, K.P., A.L. McNab, T.R. Karl, J.F. Brown, J.J. Hood, and J.D. Tarpley, 1993. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect, *Journal of Applied Meteorology*, 32(5): 899-908.
- Gallo, K.P. and T.W. Owen, 1999. Satellite based adjustment for the urban heat island temperature bias, *Journal of Applied Meteorology*, 38: 806-813.
- Hansen, P.M. and J.K. Schjoerring, 2003. Reflectance measurement of canopy using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression, *Remote Sensing of Environment*, 86: 542-553.
- Liang, S., H. Fang, J.T. Morisette, M. Chen, C.J. Shuey, C.L. Walthall, and C.S.T. Daughtry, 2002. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery-Part II: Validation and Applications, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(12): 2736-2746.
- Lo, C.P., D.A. Quattrochi, and J.C. Luvall, 1997. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect, *International Journal of Remote Sensing*, 18: 287-304.
- Owen, T.W., T.N. Carlson, and R.R. Gillies, 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.
- Qin, Z., A. Karnieli, and P. Berliner, 2001. A mono-algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application, *International Journal of Remote Sensing*, 22(18): 583-594.

- Sobrino, J.A., J.C. Jimenez-Munoz, and P. Leonardo, 2004. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5, *Remote Sensing of Environment*, 90: 434-440.
- Vermote, E.F., D. Tanré, J.L. Deuzé, M. Herman, and J.J. Morcrette, 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 675-686.
- Voogt, J.A. and T.R. Oke, 2003. Thermal remote sensing of urban areas, *Remote Sensing of Environment*, 86: 370-384.
- Weng, Q., D. Lu, and J. Schubring, 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, 89: 467-483.
- Yuan, F. and M.E. Bauer, 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 106: 375-386.
- Zhang, J., Y. Wang, and Y. Li, 2006. A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band 6, *Computer and Geosciences*, 32: 1796-1805.