

## Landsat-7 ETM+ 영상과 AWS 자료를 이용한 부산의 토지피복에 따른 여름철 도시열섬포텐셜 산출

안지숙<sup>1\*</sup> · 황재동<sup>1</sup> · 박명희<sup>1</sup> · 서영상<sup>1</sup>

### Estimation of Urban Heat Island Potential Based on Land Cover Type in Busan Using Landsat-7 ETM+ and AWS Data

Ji-Suk AHN<sup>1\*</sup> · Jae-Dong HWANG<sup>1</sup>  
Myung-Hee PARK<sup>1</sup> · Young-Sang SUH<sup>1</sup>

#### 요 약

본 연구에서는 부산의 지난 25년간 장기적 토지피복변화를 조사하고, 이어서 지표면 온도와 기온자료를 이용해서 열섬포텐셜을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다. 1975년부터 2000년까지 지난 25년 동안 부산의 도시면적은 2.5배 이상 증가하였다. 이처럼 단기간에 도시의 포장면적이 빠르게 증가한 것은 다른 나라에서는 유례를 찾아보기 어려운 우리나라 독특한 현상으로 판단된다. 이러한 과정을 통해서 도시열섬현상이 심화되었을 것이라는 것을 추정할 수 있었다. 지표면 피복에 따른 지표면 온도를 분석한 결과 도시화 지역과 산림지역의 온도가 현저히 차이가 나타났다. 특히 여름철에는 공단지역에서 36~39℃로 높게 나타났으며, 반면 도시의 중심에 산지가 위치한 지역에서는 22~24℃로 낮은 지표면 온도를 나타내었다. 토지피복도에 따른 열섬포텐셜은 지표면 피복 상태에 따라서 그 값이 달라짐을 알 수 있었다. 도시화지역 중 공업지역의 열섬포텐셜은 6~8℃, 주거지역과 상업지역은 0~5℃로 도시열섬을 유발할 가능성이 높음을 확인할 수 있었다. 반면 산림지역이나 농업지역 수변지역 열섬포텐셜 값은 -6~-3℃로 나타났다. 본 연구 결과를 통해 도시의 토지이용에 따른 기온상승효과를 평가하여 도시의 열환경 개선 및 환경친화적 도시개발 계획에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 열섬포텐셜, Landsat-7 ETM+, 토지피복

#### ABSTRACT

This study examined changes in land cover for the past 25 years in Busan and

2012년 10월 15일 접수 Received on October 15, 2012 / 2012년 11월 15일 수정 Revised on November 15, 2012 / 2012년 11월 25일 심사완료 Accepted on November 25, 2012

1 국립수산물품질관리원 수산해양정보과 Fishery and Ocean Information Division, National Fisheries Research & Development Institute

\* Corresponding Author E-mail : ahnjisuk77@gmail.com

subsequently evaluated heat island potential by using land surface temperature and observation temperature data. The results were as below. The urban area of Busan increased by more than 2.5 times for the past 25 years from 1975 to 2000. It was believed that an increase in the pavement area of city within such a short period of time was an unprecedented phenomenon unique to our country. It could be assumed that urban heat island would be worsened through this process. After analyzing the land temperature according to the land cover, it was shown that there were noticeable changes in the temperature of urban & built-up and mountain & forest areas. In particular, the temperature rose to 36~39°C in industrial areas during the summer, whereas it went down to 22~24°C in the urban areas at whose center there were mountains. It was found that heat island potential according to the level of land cover had various values depending on the conditions of land cover. Among the areas of urbanization, the industrial area's heat island potential is 6 to 8°C, and the residential and commercial area's is 0~5°C, so it has been found that there is high possibility to induce urban heat islands. Meanwhile, in the forest or agricultural area or the waterside, the heat island potential is -6~-3°C. With this study result, it is possible to evaluate the effects of temperature increase according to the urban land use, and it can be used as foundational data to improve urban thermal environment and plan eco-friendly urban development.

**KEYWORDS :** Heat Island Potential, Landsat-7 ETM+, Land Cover

## 서 론

지난 100년간 우리나라 6대 도시의 평균기온은 약 1.7°C 상승하여 세계 평균의 2배를 상회하는 것으로 나타났다. 특히, 여름의 지속기간도 지역에 따라서 13~17일 늘어나고 열대야 현상은 4~10일 증가한 반면, 겨울철 지속기간은 22~49일이나 단축되는 등 한반도가 세계 평균보다 훨씬 빠른 속도로 더워지고 있음이 확인되었다(김해동, 2011). 이러한 기온상승의 원인은 대기 중 온실가스 증가에 의한 지구온난화의 영향만이 아니라 토지이용과 피복의 변화로 인한 도시화 효과에도 크게 기인하는 것으로 알려져 있다.

도시열섬은 도시의 건설을 위하여 자연환경을 인공구조물로 변화시킨 결과의 총체적 반영이라고 말할 수 있다. 중위도 온대지역의 도시에서 볼 수 있는 도시열섬화의 주원인은

계절에 따라서 다른 것으로 알려져 있는데, 우리나라의 대도시와 같이 고밀도형 도시는 겨울에 인공열의 영향이 탁월한 것으로 알려져 있는 반면 여름철 도시열섬 형성의 가장 큰 원인은 아스팔트도로와 콘크리트 건축물의 큰 열용량에 있는 것으로 평가된다. 녹지와 물이 있는 자연 상태의 토지에 아스팔트나 콘크리트 구조물을 건설하면 자연 그대로 있는 토지와는 상이한 기후가 나타나게 된다. 즉 열섬현상에 주된 원인이 되고 있는 인공구조물의 증가는 토지이용 및 토지피복의 변화와 연관된다. 도시화에 따른 지표면 피복의 변화는 도시의 열수지를 유발하여 지표면 온도분포의 변이를 나타내고, 그 결과 도시열섬, 대기오염, 에너지 과다소비 등 직·간접적 요인으로 작용하게 된다. 토지이용과 토지피복은 과거에서부터 현재까지의 인간 활동에 의해 끊임없이 변화하는 결과로 볼 수 있으며, 생태계를 파괴하는 가장 가시적인 원인으로 판

단할 수 있다(Singh, 1995; Weng, 2001). 따라서 도시의 열섬완화를 위해서는 토지이용에 따른 지표면 온도상승의 현황을 파악하고, 이를 억제할 수 있는 대책을 수립하여 실천하여야 한다.

1980년대 중반 이후부터 대도시의 토지이용변화 측면에서 도시열섬과 관련성에 대한 연구결과들이 보고되었다. 원격탐사기법이 도시기후 연구에 도입되면서, 도시화에 따른 토지피복변화가 정량화 되고, 이러한 변화가 도심의 열환경과 어떠한 관련성을 가지고 있는지에 대해서 보다 총체적인 결과들이 제시되기 시작하였다. 최근 도시지역의 열적인 환경문제로 도시열섬 문제가 대두되면서 도시와 교외지역간의 지표면 온도와 대기 온도 차이에 관한 연구가 다수 수행되었다. 특히 위성영상으로부터 추출된 지표면온도(Land Surface Temperature : LST)는 도시의 열섬현상 및 기온상승을 규명하기 위한 주요한 인자로 활용되고 있다(Voogt and Oke, 2003; Small, 2006). 이용식(1990)은 Landsat TM 영상을 이용하여 서울의 지표면 온도를 추출하고, 이를 해석하는 한편 도시 내 토지이용에 따른 지표면 온도의 지역적 차이가 도시열섬 형성에 어느 정도 절대적인 의미를 부여하는지를 분산분석을 통해 살펴보았다. 박인환 등(1999)은 경상북도 3개 도시를 대상으로 녹지지수와 온도와의 상관성을 분석하고 녹지의 활력에 따른 온도와의 회귀모델을 도출함으로써 각 지역의 열섬분포를 파악하였다. 조명희 등(2001)은 Landsat TM band 6 영상을 이용하여 지표면 온도를 추출하고 이를 서울시 AWS(Automatic Weather Station : AWS) 기온자료와 비교하여 회귀식을 도출한 바 있다. 또한 이광재와 조명희(2004)는 Landsat TM 영상을 활용하여 광역도시를 중심으로 도시지표온도, 토지피복 및 식생지수를 시·공간적으로 분석함으로써 도시 열 환경의 공간적 분포 특성을 분석하였다.

토지피복도가 도시열섬화에 미칠 수 있는 가능성을 정량적으로 평가하기 위하여 일본의

동경공업대학에서 1994년 제안한 열섬포텐셜(Heat Island Potential : HIP)을 이용하였다(Ichinose, 2002). 열섬포텐셜은 기온과 지표면온도의 평균적인 차이로 정의되는데, 개발의대상이 되는 토지에 대해서 지표면의 변화가 주위의 온도에 미치는 영향을 평가하는 하나의 지표로서 이용되고 있다(Ichinose *et al.*, 1994). 또한 Akira *et al.*(2007)은 실제 시가지를 대상으로 HIP를 산출한 결과, 동일한 토지이용이라도 토지피복의 차이에 따라 HIP에 큰 차이가 있는 것을 밝혔다. Hirota(2008)는 실제가구를 대상으로 전 표면온도, MRT(Mean Radiant Temperature), HIP를 산출하여 수목배치와 녹화방법의 차이가 열환경에 영향이 있으며, 열부하 저감에 효과적인 수목배치와 녹화 방법을 제시하였다. 이러한 선행연구를 통해 도시에서 열환경은 토지피복형태에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다(백상훈 등, 2011).

따라서 본 연구에서는 우리나라 6대 광역도시 중 하나인 부산을 대상으로 지난 25년(1975~2000년)간 토지피복변화를 조사하고, 기상자료 및 위성영상의 분석을 통해 지표면 피복 조건에 따른 지표면 온도를 분석하였다. 그리고 부산에 설치된 자동기상관측망에서 얻어진 기상자료를 이용하여 여름철 토지피복에 따른 열섬포텐셜을 산출하여 지표면 온도의 변화가 도시기후에 미치는 영향을 정량적으로 파악하였다. 본 연구의 결과는 부산시의 도시계획정책을 평가할 수 있는 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

## 자료 및 방법

### 1. 연구대상지역

연구대상지역인 부산은 남동쪽으로 바다를 접하고 있으며, 북서쪽과 북동쪽에 금정산을 중심으로 철마산, 달음산, 장산, 백양산, 황령산 등의 산지가 존재하고, 그 가운데 시가지를 형성하고 있다. 또한 서쪽으로 낙동강을 따라

김해평야가 자리 잡고 있는 복잡한 지형을 이루고 있다. 그림 1에 제시된 ▲표시는 부산지방기상청(Busan Regional Meterological Administration)에서 운영하는 11개 지점의 자동기상측정망을 나타낸 것이다.

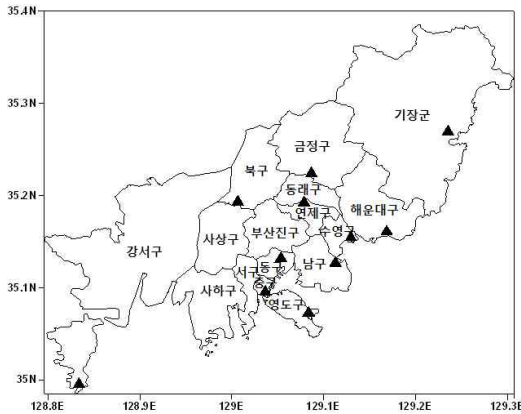


FIGURE 1. 연구대상지역 및 자동기상측정망 위치

2. 지표면 피복

부산의 장기적 토지피복변화는 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 1975년, 1990년 그리고 2000년의 자료를 ArcGIS 프로그램을 이용하여 분석하였다. 각 연도별 토지피복에 사용된 센서는 1975년은 Landsat MSS, 1990년은 Landsat TM, 2000은 Landsat ETM+이다(김주훈 등, 2007).

토지피복 분류는 1975년의 경우 수변지역, 도시화지역, 나지, 초지, 산림지역, 농업지역 등 6개 항목, 1990년과 2000년은 농경지가 논과 밭으로 분류되어 7개 항목으로 분류되어 있다. 본 연구에서는 토지피복 분류는 1975년의 분류항목을 기준으로 하여 분류하였다.

3. 지표면 온도

지표면 온도(Land Surface Temperature)는 미국지질조사국(United States Geological Survey)에서 제공하는 2007년 8월 25일의 Landsat-7 ETM+ 위성영상 열적외선 밴드 6번 중 High gain을 이용하여 산출하였다.

Landsat-7 ETM+의 경우 열적외선 Band 6은 High gain과 Low gain으로 구성되어 있으며, 이들 자료에서 산출된 온도의 차이는 평균 0.5°C이하로 두 자료 중에서 어느 것을 선택해도 사용가능하다(이훈열과 한향선, 2005). Landsat-7 ETM+의 열적외선 영상에 기록된 Digital Number(DN) 값은 아래의 식을 따라 방사휘도(Radiance)값으로 변환된다(Chander *et al.*, 2003). 식 (1)에서 LMAX와 LMIN은 분광파장의 에너지의 크기, QCAL은 계산될 영상의 DN값, QCALMIN은 DN의 최소값으로 0이나 1, QCALMAX는 DN의 최대값으로 255값을 사용하였다. 각 파라미터의 개별 상수 값은 표 1과 같다.

$$L_{\lambda} = ((LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) / (QCALMAX - QCALMIN)) * (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda}$$

Landsat 위성영상에서 지표면온도 산출은 방사휘도값을 이용하여 NASA에서 제공하는 경험식을 통해 계산하였다. 식 (2)에서  $K_1$ 과  $K_2$ 는 분광방사휘도와 절대온도의 보정계수로 표 2에 나타내었다. 위성에서 계산되어진 온도 값은 절대온도로 일반적인 온도 단위인 섭씨온도로 변환하기 위해서 273.15를 빼주어 계산하였다.

TABLE 1. Landsat-7 ETM+ 열적외선밴드 분광방사휘도(단위: watts/(meter squared\*ster\*μm))

Low Gain		High Gain	
LMIN	LMAX	LMIN	LMAX
0.0	17.04	3.2	12.65

TABLE 2. Landsat-7 ETM+ 열적외선밴드 보정계수

Constant	$K_1$ ( $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$ )	$K_2$ (Kelvin)
Landsat-7 ETM+	666.09	1282.71

$$T = K_2 / \ln((K_1 / L_\lambda) + 1) - 273.15 \quad (2)$$

4. 열섬포텐셜

열섬포텐셜(Heat Island Potential)은 지표와 대기간의 현열 교환량을 산정하는 것으로 도시의 기온에 대해서 도시구조의 동질성이 인정되는 지역이 갖는 잠재적인 지표면 온도와와의 차이를 표현한 지표이다. 즉 열섬포텐셜 값이 클수록 표면온도와 기온의 차가 크고 열섬현상의 원인 되는 지표에서 방출되는 현열이 크다는 것을 의미하며, 작은 값 일수록 도시내 열환경에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다.

주간에 지표면에서 대기 중으로 운반되는 현열에 의한 열섬포텐셜 추정을 위하여 그림 1에 표시된 지점에서 관측된 연구대상일의 기온자료를 표 3에 나타내었다.

토지피복별 열섬포텐셜의 공간적인 분포 산출에 필요한 기온은 각각의 지역에 인접해 있는 자동기상관측장치에서 얻어진 기온자료를 사용하였다. 자동기상관측장치가 없는 지역은 지리적 특징과 토지피복율이 유사한 지역의 기상자료를 사용하였다. 토지피복도에 따른 열섬포텐셜은 식 (3)의 방법으로 계산하였다. 주어진 지역의 지표에서 대기로 운반되는 단위시간, 단위면적당 현열(sensible heat flux)은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$Q = \frac{\int_{\text{전지표면}} asc(T_s - (T_a + T_a'))dS}{Sd} \quad (3)$$

여기서 Q는 지표에서 대기로의 단위시간, 단위면적당의 현열( $W/m^2$ ), asc는 미세영역에 있어서 국지적 대류열전달율( $W/(m^2K)$ ),  $T_s$ 는 미소면적의 지표면온도(K),  $T_a$ 는 도시 canopy 층 내부의 평균기온(K),  $T_a'$ 은 도시 canopy 층 내의 주어진 지점의 기온과 층 내부의 평균기온과의 차이(K) 그리고 Sd는 대상영역의 수평면 투영면적( $m^2$ )을 의미한다.

위의 식으로 현열을 구하기 위해서는 대류열전달율 및 주어진 지역의 지표면온도와 기온과의 온도차를 구하여야 한다. 계산을 단순화하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였는데, 이는 일반적으로 받아들여지는 것이다.

① 도시 canopy 층 내 기온의 공간분포는 관측에에 의하면 일반적으로는 수 °C의 범위에 있다. 그러나 표면온도분포는 수 십°C에 이른다. 이 때문에 제 1 근사로 도시 canopy 층 내부 기온의 공간분포는 무시할 수 있는 것으로 간주한다.

② 열섬현상이 약풍 조건 하에서는 지표면에 있어서 대류열전도율의 공간분포는 작다. 이 때문에 대류열전도율은 도시 canopy층의 상층풍의 함수로 주고 그 공간분포는 고려하지 않는다.

이상을 근거로 하여 다음 식으로 구해지는 값을 “도시의 전지표면으로부터의 대류열전달 즉, 현열에 의한 열섬포텐셜”이라고 정의한다. 이하에서는 식 (4)와 같이 HIP라고 나타내었다.

TABLE 3. 연구 대상일의 자동기상관측망의 기온자료

(단위 : °C)

관측망	부산	영도	부산진	동래	대연	북구	수영만	해운대	금정구	가덕도	기장
	30	29.4	32.2	32.2	31.6	30	31.7	30.6	28.7	31.2	30.2

$$HIP = \frac{\int (T_s - T_a) dS}{Sd} \quad (4)$$

이 수식을 이용하여 다양한 토지피복에 따른 열섬포텐셜을 계산하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 지표면 피복의 장기적 변화 경향

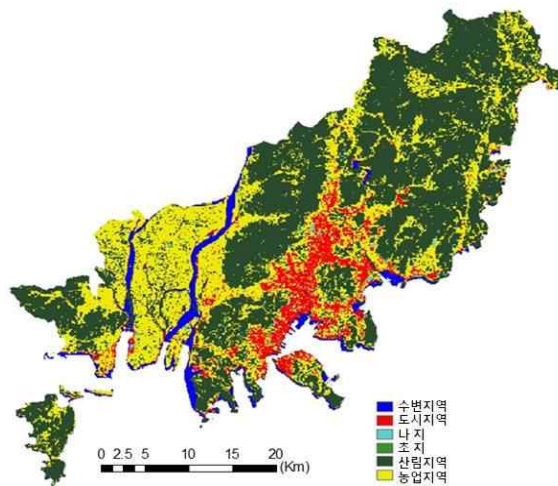
토지피복에 따른 열섬포텐셜을 산출하여 지표면 온도의 변화가 도시기후에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 우선 지표면 피복의 장기적 변화 경향을 살펴보았다.

그림 2는 1975년부터 2000년까지의 부산의 장기적인 토지피복 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 지표면상태를 수변지역, 도시화지역, 나대지, 초지, 산림지역, 농업지역 등 6개의 종류로 분류하였다. 1975년에 비하여 1990년과 2000년에 인공구조물로 피복된 도시영역의 현저한 확장을 보여 시간의 변화에 따라 도시화가 급격하게 이루어졌음을 알 수 있다. 농경지와 나지가 도시화 지역으로 많이 전환된 것을 알 수 있으며, 다음이 산림의 순

서로 나타난 것을 확인 할 수 있었다. 특히 1975년과 1990년 사이에 낙동강 주변 농업지역과 시가지 내 산림지역이 도시화 지역으로 급격하게 변화하였으며, 1990년과 2000년 사이에는 해운대 신시가지 조성과 낙동강 하구둑 주변 매립으로 인해 도시화 지역으로 많은 개발이 이루어졌다.

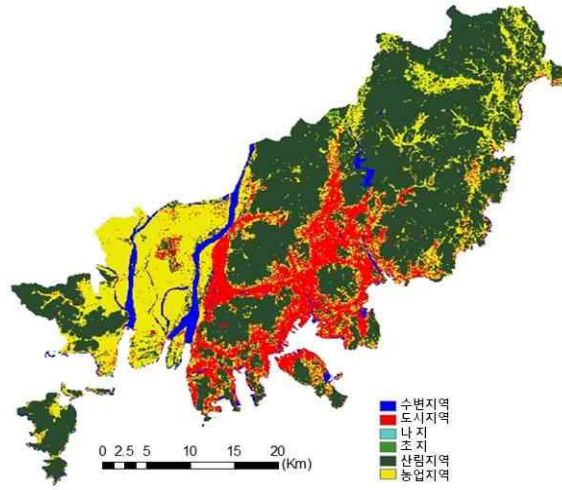
부산의 토지피복도 변화를 항목별로 표 4에 제시하였다. 표에 제시된 숫자는 연도별 각 카테고리가 차지하는 비율을 나타낸 것이고, 괄호에 나타낸 숫자는 1975년을 100으로 보았을 때의 상대적 비율을 나타낸 것이다. 1975년도에서 2000년까지 25년간의 토지이용도의 변화는 도시화지역이 차지하는 비율이 7.5%에서 18.7%로 증가하였는데, 이는 급속한 도시화를 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다. 산림지역이 차지하는 면적은 1975년도에는 55.7%로 나타났으나 2000년에는 52%로 감소하였다. 농업지역의 면적은 1975년에는 약 31.8%였으나, 1990년과 2000년에 26.6%, 25.8%로 점점 감소하였다.

그리고 1975년을 기준으로 하여 그때의 값을 100%로 봤을 때, 산림지역은 1990년에

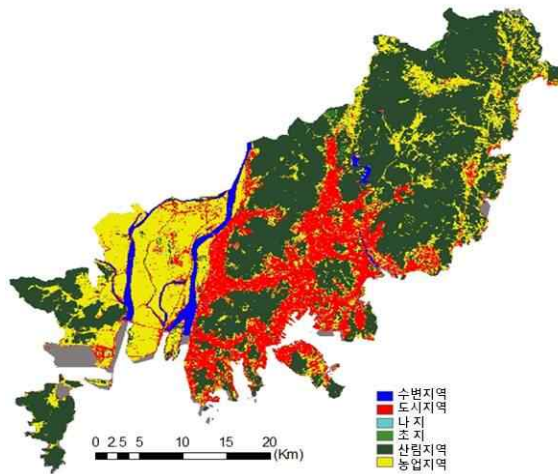


<1975년>

FIGURE 2. 부산지역의 토지피복분류도



<1990년>



<2000년>

FIGURE 2. 계속

96%, 2000년에 92.8%로 감소하였고, 수변 지역도 1975년에 비하여 감소하였다. 농업 지역도 1990년에는 83%, 2000년에는 61%로 감소한 것을 확인 할 수 있다. 반면에 도시화 지역과 초지는 1975년에 비해 2000년에 각각 2.5배와 4.2배 증가한 것으로 나타났다. 초지의 경우 도시 내 공원의 조성으로 인해 증가가 큰 것으로 판단된다. 전체적으로 봤을

때, 수변지역, 나지, 산림지역과 농업지역이 감소하는 반면, 도시화지역과 초지는 크게 증가한 것으로 나타났다.

각 구별 지표면 피복 분류 항목이 차지하는 비율을 나타내었다(표 5). 항목별로 변화율은 수변지역, 나지, 초지, 산림지역, 농업지역 비해 도시화 지역의 변화율이 크게 나타난 것을 알 수 있다. 특히 사상구와 사하구는 1975년

TABLE 4. 지난 25년간 부산지역의 토지피복 항목별 변화 (단위:%)

	1975	1990	2000
수변지역	35331	31052	23548
	(100)	(88)	(67)
	4.19	3.71	2.80
도시화지역	62858	124385	157213
	(100)	(198)	(250)
	7.46	14.83	18.72
나지	6460	1803	1995
	(100)	(28)	(31)
	0.77	0.22	0.24
초지	848	6119	3559
	(100)	(721)	(420)
	0.10	0.73	0.42
산림지역	469415	452124	436766
	(100)	(96)	(93)
	55.72	53.95	52.01
농업지역	267518	222794	216760
	(100)	(83)	(61)
	31.76	26.57	25.81

에 비해 2000년에 각각 약 10배와 6배 정도 도시화 지역이 확장된 것을 알 수 있으며, 농업지역이 2배 정도 감소한 것으로 나타나 농업지역이 도시화 지역으로 개발 된 것을 알 수 있다. 2000년의 경우 중구는 부산의 대표적인 상업밀집지역으로 도시화지역의 비율이 78%로 나타났고, 상업과 주거지역이 비슷한 비율로 이루어진 동구는 약 60%로 나타났다. 이들 지역은 다른 지역에 비하여 산림지역, 농경지 및 나지 등 도시화가 되지 않은 지역이 낮은 비율로 이루어진 것을 확인 할 수 있었다. 주거 밀집지역인 남구, 동구, 동래구, 수영구 및 연제구에서는 도시화지역이 50% 전후로 나타났으며, 수변지역, 나지, 초지, 산림지역 및 농업지역도 유사한 분포특성을 나타냈다. 한편 대규모 공업지역이 밀집되어 있는 사상구와 사하구는 비슷한 비율의 토지이용도 분포를 나타냈으며, 도시화 지역이 약 40%로 산림지역, 농업지역 및 나지 등 도시화가 되지 않은 지역과 비슷한 비율을 나타내었다. 이는 부산 특성상 도심에 산지가 위치하고 있는 영향이 큰 것으로 생각된다. 낙동강 하구 평야지대에 위치하고 있는 강서구는 수변지역

이 약 7.1%, 그 중심으로 농업지역이 발달하여 55.3%로 큰 비율을 차지하고 있으며, 대규모 공업단지가 위치하고 있는 반면 도시화지역은 약 7.9%로 다른 구들에 비하여 작은 비율로 나타났다. 앞에서 언급하였듯이 산지 사이에 시가지가 형성된 도시 특유의 특색으로 인해 중구를 제외하고 도시 전체에서 산림지역이 차지하는 비율이 약 25% 이상으로 나타났는데, 특히 금정구, 기장군, 서구 그리고 해운대구에서 큰 비율을 차지하고 있는 것을 알 수 있었다.

## 2. 지표면 피복에 따른 지표면 온도와 열섬포텐셜 분석

도시화로 인한 지표면 피복 변화는 녹지의 감소와 도로포장률 증가에 따른 열저장 용량의 차이로 인하여 주변 교외지역과는 다른 도시 특유의 기온상승을 유발시킨다. 도시 내 지표면 피복 조건에 따른 지표면 온도의 변화가 도시열섬에 주는 영향을 정량적으로 평가하고자 그림 3에 부산의 여름철 지표면 온도 분포를 Landsat-7 ETM+ 영상으로부터 산



TABLE 5. 각 구별 지표면 피복 분류 (단위:%)

	수변지역			도시지역			나지			초지			산림지역			농업지역		
	1975	1990	2000	1975	1990	2000	1975	1990	2000	1975	1990	2000	1975	1990	2000	1975	1990	2000
강서구	8.0	7.7	7.13	2.1	3.1	7.3	0.4	0.1	0.33	0.0	0.2	0.31	37.6	31.4	29.1	51.8	57.5	55.3
금정구	1.2	3.0	2.12	5.0	10.7	14.3	0.7	0.2	0.14	0.1	1.0	1.16	67.4	71.1	69.0	25.6	14.1	13.3
기장군	0.5	0.6	0.15	0.5	1.3	2.1	0.2	0.0	0.13	0.2	1.5	0.67	78.3	77.7	76.3	20.2	18.9	20.6
남구	7.1	3.3	0.33	25.1	42.1	45.2	2.3	0.7	0.86	0.0	1.0	0.28	34.7	35.1	34.2	30.8	17.8	17.2
동구	11.1	2.8	0.30	44.9	58.0	59.9	3.9	0.3	0.16	0.0	0.2	0.00	22.1	28.4	29.2	18.0	10.4	10.3
동래구	0.3	1.4	0.42	25.6	48.5	54.0	3.9	0.5	0.11	0.0	0.1	0.02	34.3	31.5	31.2	36.0	18.0	14.2
부산진구	0.5	0.7	0.18	31.2	40.5	44.1	1.0	0.5	0.19	0.0	0.1	0.03	37.0	45.2	43.2	30.3	13.0	12.3
북구	3.6	5.2	5.30	0.6	10.0	17.9	0.0	0.4	0.06	0.1	0.0	0.06	72.5	66.2	62.7	23.2	18.2	14.0
사상구	4.8	7.7	6.55	4.3	32.4	38.2	0.1	0.2	0.06	0.0	0.0	0.24	47.8	41.6	37.8	42.9	18.0	17.2
사하구	13.1	7.5	4.67	7.5	33.4	38.5	1.3	0.5	0.18	0.0	0.7	0.08	49.4	37.1	35.5	28.6	20.7	19.2
서구	4.6	3.1	0.59	20.9	30.2	33.5	1.1	0.2	0.18	0.0	1.1	0.07	43.3	50.4	52.2	30.1	15.0	13.1
수영구	6.0	2.9	1.57	32.9	53.4	56.0	4.9	0.4	0.20	0.0	0.1	0.24	28.3	24.0	25.3	27.9	19.1	15.5
연제구	0.2	0.5	0.01	37.0	55.2	57.1	0.4	0.3	0.64	0.0	0.1	0.06	29.3	29.7	27.6	33.1	14.1	14.6
영도구	8.9	5.8	0.69	20.5	36.3	40.1	0.6	0.4	0.43	0.0	0.4	0.12	41.7	38.9	37.2	28.2	18.1	20.5
중구	7.8	6.3	0.64	60.1	65.0	77.2	2.1	0.2	0.00	0.0	8.7	0.06	9.1	8.7	9.9	21.0	11.2	11.5
해운대구	3.9	0.7	0.51	7.9	16.2	22.8	1.8	0.3	0.53	0.0	0.6	0.33	58.0	62.9	59.8	28.4	19.2	15.9

출하여 나타내었다. 도시전체에서 높은 지표면 온도가 나타났다. 강한 일사에 의한 지표면 가열로 인해 인공구조물로 이루어진 도시화 지역과 산림지역, 수변지역, 농업지역과의 지표면 온도 차가 다른 계절에 비해 뚜렷하게 나타났으며, 지형적 영향으로 해발고도가 높은 산악지역과 평야지대의 지표면 온도차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 지역별로 살펴보면 도시화지역이 큰 비중을 차지하고 있는 연제구, 중구, 동구의 평균 지표면 온도가 31.6~32.1℃로 높게 나타났으며, 반면 산림지역 등 녹지화 비율이 높은 기장, 북구, 해운대구에서는 27.4~28.5℃의 낮은 온도를 나타냈다. 토지피복별로 살펴보면 위성이 관측한 시간이 오전 11시경임에도 불구하고 도시화 지역 중 강서구의 녹산국가산업단지과 사하구에 위치한 신평장림공단, 사상구 공업지역에서 지표면 온도가 전반적으로 35~38℃로 나타났으며, 해운대구에 위치한 공업지역에서는 최고 약 47℃에 이르렀다. 반면 강서구 공업지역에서는 30~32℃의 분포를 보인 곳도 있

는데, 이는 공장주변 공원지역에 의한 것으로 부산진구의 쇼핑센터와 상업시설로 이루어져 대형건물이 밀집되어 있는 곳은 33~36℃, 동래구, 연제구, 수영구 서구의 주거지역에서 32~34℃로 나타났다. 이는 기장군, 북구, 금정구에 위치해있는 산림지대는 24~26℃로 이는 도시화 지역에 비해 8~10℃ 정도 낮은 온도이다. 또한 사상구의 아파트 밀집지역에서는 지표면 온도가 36~38℃로 공업지역과 비슷한 온도 분포를 보였다. 강서구지역의 농업지역과 수변지역은 각각 25~28℃로 산림지역과 유사한 지표면 온도 분포를 나타내었다. 부산 도심의 산림지역은 낮은 지표면 온도를 나타내고 있는 반면 이들 산림지역을 중심으로 위치하고 있는 공업단지, 상업지역 등 도시화지역에서 전반적으로 높은 지표면 온도를 나타내고 있었다. 또한 항만 등 일부 해안선 주변지역에 높은 지표면 온도대가 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었는데, 이들 지역 대부분은 콘크리트 인공구조물로 형성되어 나타난 결과로 판단된다. 이러한 결과는 여름

한낮 인공구조물로 이루어진 아파트단지 내 아스팔트 표면온도가 50℃를 나타낼 때, 잔디면은 25℃ 내외로 나타난 선행관측결과와 잘 부합하는 것으로 판단된다(김해동 등, 2003).

지표면 피복에 따른 지표면 온도가 대기의 공기를 가열·냉각시키는 효과를 정량적으로 평가하기 위하여 열섬포텐셜의 공간적인 분포를 그림 4에 나타내었다.

도시 곳곳에 위치한 산림지역에서는 -6~-4℃의 분포를 보였고, 강서구의 수변지역과 농업지역에서는 -5~-3℃을 보여, 녹지로 피복된 지표에서 방출된 온도가 대기의 공기를 냉각시키는 것으로 판단된다. 반면 도시화 지역 중 공업지역에서 열섬포텐셜이 6~8℃로 나타났으며, 또한 앞 절에서 언급한 해운대구에 위치한 공업지역에서는 약 14℃로, 산림지역에 비해 18~20℃ 높게 나타났다. 상업지역에서는 1~3℃, 주거지역은 0~2℃, 사상구에 위치한 대단위 아파트 지역에서는 3~5℃으로 나타나 도시화지역에서 도시열섬을 유발할 가능성이 높음을 확인할 수 있었다.

열섬포텐셜 산출에 사용된 Landsat-7 ETM+ 영상이 오전에 관측된 자료이기 때문에 상업지역과 아파트지역, 공업지역의 열섬포텐셜의 값이 전반적으로 낮게 산출되었으며, 이중 가장 높게 산출된 공업지역과 가장 낮게 산출된 산림지역의 경우 18~20℃의 차를 나타내어 인공구조물로 포장된 지역에서 도시열섬을 유발할 가능성이 훨씬 높음을 확인할 수 있었다. 이는 토지피복도에 따른 지표온도 특성을 잘 나타내는 것으로 도심지역의 경우 도시피복이 아스팔트, 콘크리트와 같은 빌딩 및 도로 등으로 이루어져있어 도심지역의 온도상승의 원인으로 판단된다.

이러한 결과로 볼 때 도시의 기온을 저감시키기 위해서는 포장화 지역의 지표면의 온도를 낮춰 주는 것이 중요하다고 할 것이다(Horikuchi *et. al.*, 2004). 특히 공업지역과 대단위 아파트단지에서는 공원 등의 녹지지역을 조성하고, 공장 내의 주차장, 지붕 등을 녹화함으로 인해 지표온도의 상승을 저감시켜야 할 것으로 판단된다. 산림지역의 경우 지표면

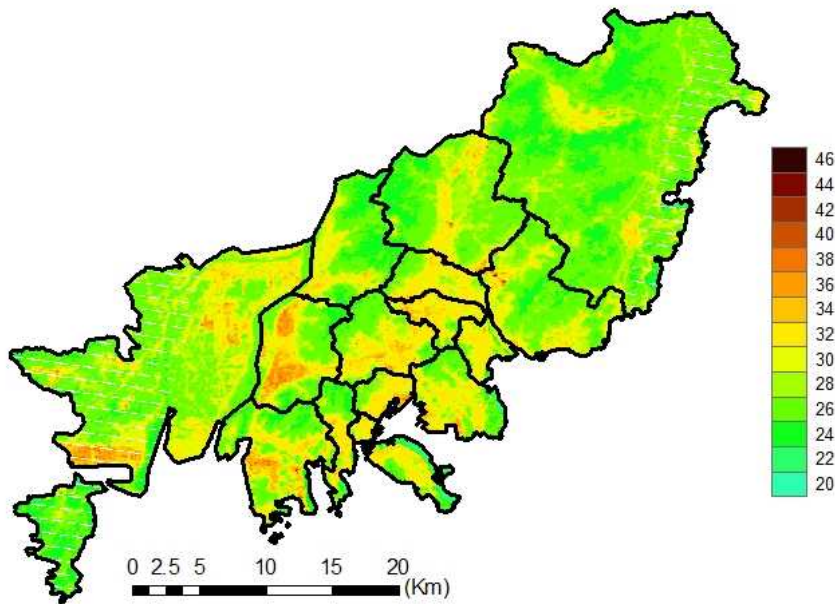


FIGURE 3. Landsat-7 ETM+로부터 산출된 2007년 8월 25일의 지표면 온도(℃) 분포도

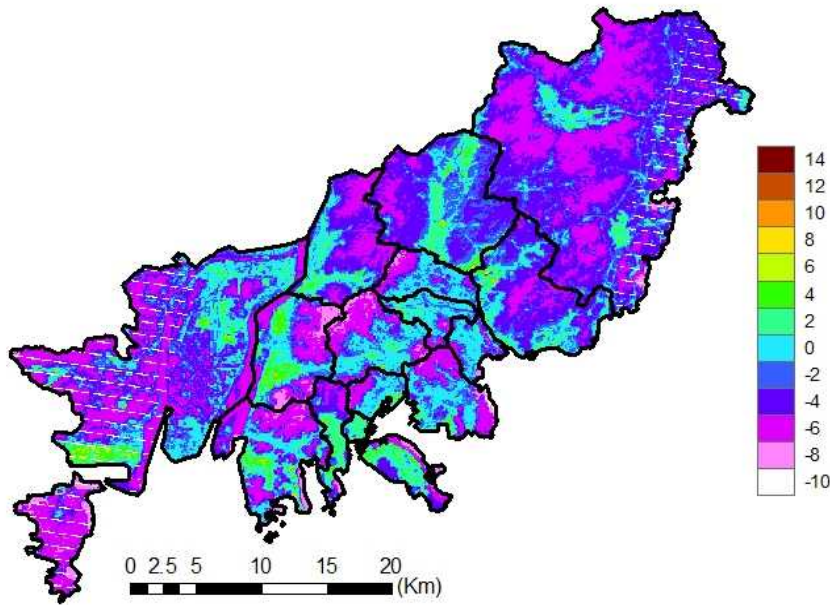


FIGURE 4. 부산의 2007년 8월 25일 열섬포텐셜(°C) 분포도

의 온도가 기온을 냉각시키는 것으로 나타났는데, 녹지는 아스팔트에 비하여 반사도가 크기 때문에 태양에너지의 흡수량을 저감시켜 지표면과 하층대기의 기온 상승을 억제시키는 역할을 한다는 것을 알 수 있다(Sugawara and Kondo, 1995).

## 결론

도시화의 진척에 따라서 다양한 요인에 의해 도시열섬현상이 심화되어 가고 있지만 동계에는 인공열의 영향, 하계에는 인공구조물에 의한 열저장효과가 가장 큰 기여를 하는 것으로 알려져 있다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 자연환경이 인공구조물로 변해감으로써 도시열섬이 얼마나 심화 될 수 있는지를 평가하여 보았다. 우선 부산지역의 지난 25년간 장기적 토지피복변화를 조사하고, 이어서 지표면 온도와 기온자료를 이용해서 열섬포텐셜을 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

지난 1975년부터 2000년까지 25년 동안

부산지역의 포장화 된 도시면적은 2.5배 이상 증가하였다. 이처럼 단기간에 도시의 포장면적이 빠르게 증가한 것은 다른 나라에서는 유례를 찾아보기 어려운 우리나라의 독특한 현상으로 판단된다. 이러한 과정을 통해서 도시열섬현상이 심화되었을 것이라는 것을 추정할 수 있었다. 향후 정확한 분석을 위해 2000년대 이후의 토지피복분류가 필요할 것으로 사료된다.

지표면 피복에 따른 지표면 온도를 분석한 결과 도시화 지역과 산림지역의 온도가 현저히 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 강서구, 사하구, 사상구에 위치한 공장지역에서 높은 지표면 온도를 나타냈었는데, 특히 여름철에는 공단지역에서 36~39°C로 높게 나타났다. 반면 상대적으로 도시의 중심에 산지가 위치하고 있는 기장군, 금정구, 북구에서는 22~24°C로 낮은 지표면 온도를 나타내었다.

토지피복도에 따른 열섬포텐셜의 평가를 통해서 지표면 피복 상태에 따라서 그 값이 다름을 알 수 있었다. 포장된 도시화지역의 열섬포텐셜은 0~14°C로 나타났으며, 특히 공업

지역은 6~8℃로 주거지역보다 6℃ 정도 높은 열섬포텐셜을 나타냈는데, 이는 대부분이 아스팔트, 콘크리트로 포장되어 공장에서 방출된 방사열로 인해 지표면 온도의 상승으로 인한 것으로 판단된다. 따라서 녹지시설을 증가시키고 공장 내 주차장과 지붕 녹화로 지표면 온도를 낮추어야 한다. 산림지역에서는 -6~-4℃, 수변지역과 농업지역에서는 -5~-3℃을 보여, 토양수분 및 식물의 증발산 작용으로 인해 녹지로 피복된 지표에서 방출된 온도가 대기의 공기를 냉각시키는 것으로 판단된다. 토지피복도에 따른 태양복사에너지의 흡수율과 현열에너지로의 전환비율의 차이 및 열전도도의 차이에 크게 의존한다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과에서와 같이 토지피복특성은 도시의 열환경에 많은 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 또한 토지피복별로 지표면 온도와 열섬포텐셜의 차이가 발생하기 때문에 각 유형에 적합한 관리계획이 제시되어야 할 것이다(이우성 등, 2010). 도시의 고온화는 인간이 만든 것이기 때문에 역으로 인간 노력으로 상당 부분 역제가 가능하다. 덥고 일사가 강한 여름철 낮기온을 낮추기 위해서 도시내 녹지대를 조성하고, 증발로 인한 냉각 효과를 증대시키기 위해 거리에 물을 뿌리는 일 이외에도 건물이나 지표면의 일사에 대한 일베도를 높이는 것이 필요하다. 알베도를 높이기 위해서는 건물의 지붕이나 벽에 밝은 색의 페인트를 칠하거나, 어두운 건물의 벽면에 담쟁이 식물을 이용하여 녹화를 하는 방법도 있다.

지금까지 도시 팽창의 가속화에 따른 이익 창출이라는 경제논리에 밀려 오히려 녹색성장이라는 목표에 역행하는 도시 정책들이 진행되었다. 최근 우리나라에서도 전 지구 기후변화의 저감 대책으로 다양한 녹색성장을 모토로 한 도시계획정책들이 제시되고 있다. 본 연구의 결과는 도시의 토지이용에 따른 기온 상승효과를 평가하여 도시의 열환경 개선 및 환경친화적 도시개발 계획에 기초자료로 활용

될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국립수산과학원의 “첨단해양탐사 시스템 활용 한반도 주변 해양변동 조사 및 운영(RP-2012-ME-067)” 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. [KAGIS](#)

## 참고문헌

- 김주훈, 이충대, 김경탁, 최윤석. 2007. WAMIS 토지피복도를 활용한 토양유실량 분석 -무심천 유역을 대상으로-. 한국지리정보학회지 10(4):122-131.
- 김해동. 2011. 도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안. 기상기술정책 4(2): 31-42.
- 김해동, 이송욱, 구현숙. 2003. 대규모 주택단지내의 인공구조물에 의한 승온화 효과에 관한 연구. 환경환경과학회지 12(7):705-713.
- 박인환, 장갑수, 김종용. 1999. 추이대를 중심으로 한 경상북도 3개 도시열섬평가. 한국환경평가학회지 8(2):73-82.
- 백상훈, 시미즈아키, 김학운, 정우호. 2011. 도시가로공간의 공공디자인 개선사업에 따른 열환경 개선효과 평가. 한국환경과학회지 20(9):1105-1114.
- 이광재, 조명희. 2004. 공간정보기술을 활용한 도시지역 지표온도 분포 특성해석. 대한원격탐사학회지 20(6):397-408.
- 이용식. 1990. 도시열섬분석에 있어서 원격탐사기법의 적용에 관한 연구. 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 이우성, 정성관, 박경훈, 김경태. 2010. 친환경적 공간계획을 위한 도시의 열환경 분석. 한국지리정보학회지 13(1):142-154.

- 이훈열, 한향선. 2005. Landsat 시계열 영상을 이용한 한강 수계 호수 수온과 계절적 성층 현상 분석. 한국원격탐사학회지 21(4):253-271.
- 조명희, 이광재, 김운수. 2001. 위성탐사자료와 GIS를 활용한 도시표면 온도의 공간적 분포 특성에 관한 연구. 한국지리정보학회지 4(16):56-65.
- Akira, H., A. Takashi, M. Akinobu, S. Rihito and N. Kazuaki. 2007. 3D-CAD modeling of a substantial urban area and heat island potential of urban blocks in summer. Journal of Environmental Engineering(Transactions of AIJ) 612:97-104.
- Chander, G. and B. Markham. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41(11):2674-2677.
- Hirota, S. 2008. Thermal environment simulation in the different cases of tree planting method and combing with wall greening in an actual block. Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology 34(2):399-408.
- Horikuchi, I., T. Kobayasi, O. Tsukamoto, K. Outsuki. 2004. Local Meteorology. Morikita Publing Co. JAPAN 244pp.
- Ichinose, T. 2002. Counteractions for urban heat island in regional autonomies activities in councils of MoE, Japan. Journal of Atmospheric Environment of Japan 37(6):A71-A84.
- Ichinose, T., K. Hanaki and T. Tatsuo. 1994. Analysis on geographical distribution of urban anthropogenic heat based on very precise geographical information. Proceedings of Environmental Engineering Research 31:263-273.
- Singh, R.B. 1995. Global Environmental Change: Perspectives of Remote Sensing and Geographic Information System. Balkema Publishers. Rotterdam, 321pp.
- Small, C. 2006. Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature. Remote Sensing of Environment 104:168-189.
- Sugawara, H. and J. Kondo, 1995. Sensitivity test of urban surface temperature. Tenki 42:813-820.
- Weng, Q. 2001. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujing Delta, China. International Journal of Remote Sensing 22(10):1999-2014.
- Voogt, J.A. and T.R. Oke. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment 86:370-384. KAGIS