

무인항공 영상을 활용한 도심녹지 표면온도 특성 분석* - 익산 소라산 자연마당을 대상으로 -

최태영¹ · 문호경¹ · 차재규^{1*}

Analysis of Surface Temperature on Urban Green Space Using Unmanned Aerial Vehicle Images* - A Case of Sorasan Mt. Nature Garden, Iksan, South Korea -

Tae-Young CHOI¹ · Ho-Gyeong MOON¹ · Jae-Gyu CHA^{1*}

요 약

본 연구는 도심온도 저감을 위한 녹지의 기능을 규명하기 위하여 여름철 고온 시간대에 도심녹지에서 나타나는 표면온도 특성을 분석하였다. 도시 내 고립된 녹지인 익산 소라산 자연마당을 대상으로 고해상도 UAV 영상을 활용하여 정밀한 표면온도 자료를 취득하였고, 피복유형, 식생유형, 수종유형, 수종별 녹지용적과 표면온도와의 관계를 분석하였다. 연구결과 피복유형 중 습지와 산림은 저온역, 포장지는 표면온도가 월등히 높은 고온역으로 확인되었다. 식생유형에서는 산림 내 침엽수보다 활엽수의 표면온도가 낮았고, 조경수식재지 내에선 활엽수보다 침엽수의 표면온도가 낮은 반대의 결과가 확인되었다. 장초지보다 단초지의 표면온도가 높아 초지의 용적에 따른 온도차이가 확인되었다. 산림수종유형별 표면온도는 침엽수인 소나무림보다 활엽수인 아까시나무림과 활엽수혼효림의 표면온도가 낮았고, 활엽수혼효림과 아까시나무림간의 미세한 표면온도 차이가 확인되었다. 산림수종유형별 녹지용적과 표면온도 분석결과 소나무림과 활엽수혼효림에서는 기존 연구결과와 유사하게 녹지용적 증가에 따라 표면온도가 감소하는 음의상관관계가 확인되었다. 그러나 아까시나무림은 용적의 증가에 따라 미세하게 표면온도가 상승하는 약한 양의상관관계가 확인되어 수종에 따라서는 용적과 온도의 일관된 상관성에 예외가 있을 수 있음을 확인하였다. 향후 침엽수와 활엽수간 차이, 용적과 온도의 관계, 수종별 차이 등 녹지의 세부적 속성과 온도의 관계에 관하여 정밀한 공간자료를 활용한 다각적인 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

주요어 : 열적외 영상, 토지피복, 식생, 산림수종, 녹지용적

ABSTRACT

2017년 9월 7일 접수 Received on September 7, 2017 / 2017년 9월 20일 수정 Revised on September 20, 2017 / 2017년 9월 23일 심사완료 Accepted on September 23, 2017

* 본 연구는 국립생태원의 자체연구과제(NIE-기반연구-2017-08) 지원으로 수행되었으며, (사)한국환경생태학회 2017년 춘계 학술대회에서 소개된 내용을 수정·발견시켰음.

1 국립생태원 생태연구본부 Bureau of Ecological Research, National Institute of Ecology

* Corresponding Author E-mail : flow@nie.re.kr

This study analyzed the surface temperature characteristics of urban green spaces under high summer temperatures to clarify the functions of green spaces in reducing urban temperatures. We obtained accurate surface temperature data using high-resolution unmanned aerial vehicle images of the survey site, which was an isolated green space in the city. We analyzed differences in the surface temperature by land cover type, vegetation type, species type, and the relationship between surface temperature and vegetation volume. Based on the results, among the land cover types, wetlands and forests had low temperatures and paving areas had very high temperatures. Regarding vegetation type, broad-leaved trees had lower temperatures than coniferous trees in forests. However, in planted areas, coniferous trees had lower temperatures than broad-leaved trees. The temperature of long grass was higher than that of short grass, which suggested that the volume of grass affected the temperature. Regarding forest species type, the temperature of broad-leaved *Robinia pseudoacacia* forest and mixed broad-leaved forest was lower than coniferous *Pinus densiflora* forest. There was a slight difference in temperature between *R. pseudoacacia* forest and mixed broad-leaved forest. The analysis of the relationship between vegetation volume and temperature by forest species type indicated a negative correlation, where the temperature decreased with increasing vegetation volume, similar to the results of previous studies. However, we found a weak positive correlation in *R. pseudoacacia* forest; therefore, an increase in volume may not reduce the surface temperature depending on the dominant species.

KEYWORDS : Thermal Infrared Image, Land Cover, Vegetation, Forest Species, Vegetation Volume

서론

도시화로 인한 급격한 환경변화가 야기한 도시기후는 외곽지역에 비해 도시 내부의 온도가 상승하는 도시열섬(Urban Heat Island) 현상으로 대표된다(Landsberg, 1981; Montavez *et al.*, 2000). 도시열섬 현상은 인공 포장면 등 도시 구조물의 열 저장능 및 인위적인 열 방출의 증가가 주변 자연지역에 비해 월등히 높아 발생한다(Hutcheon *et al.*, 1967; Olfe and Lee, 1971; Oke, 1973; Hong, 2013). Watkins *et al.*(2002)은 영국 런던의 대기온도가 교외지역보다 7℃까지 높다고 보고하였고, Imhoff *et al.*(2010)에 따르면 미국 38개 도시의 연간 대기온도가 주변지역 대비 평균 2.9℃ 높았다. 이러한 도시열섬 현상은 대기온도 뿐만 아니라 표면온도를 통해서도 확인되고 있다(Voogt and Oke, 2003).

도시열섬은 도시 크기, 지형 특성, 식생 면적, 불투수 포장면적, 인공열 발생 등의 공간적 특성과 도시가 위치한 기후대, 구름과 바람 상황, 대기오염 등의 기후적 여건 등 다양하고 복잡한 요인들의 영향을 받는다(Montavez *et al.*, 2000; Imhoff *et al.*, 2010; Peng *et al.*, 2012). 도시열섬에 대응하여 온도 영향요인 규명을 위한 많은 연구가 진행되어 왔는데, 최근까지 인공위성영상자료를 활용한 지표면 온도와 열환경 사이의 관계 연구가 가장 활발하게 진행되었다(Hong, 2013). 일반적으로 도시의 인공적 요소는 온도증가 요인이고, 녹지 등 자연 요소는 저감요인으로 여겨진다. 위성영상을 활용한 연구결과도 도시지역의 녹지율, 녹지용적, NDVI 등 녹지 요인의 증가에 따라 표면온도가 감소하고, 불투수지역, 건물용 등 인공적 요인은 표면온도를 증가시키는 것으로 보고되고 있으며(Hong *et al.*, 2005; Ki and Lee, 2009; Lee *et al.*, 2010), 세부적으로는 건축물 표면

의 알베도 차이나 녹지의 유형과 배치에 따라서 온도 영향이 달라질 수 있다고 하였다(Myint *et al.*, 2013). 기존 연구들이 제시하는 온도저감을 위한 중요한 요인 중 하나는 녹지이며, 도시녹지 계획과 조성은 도시열섬 저감을 위한 대안으로 제시되고 있다(Bowler *et al.*, 2010). 이와 관련하여 도시녹지의 온도저감 특성을 밝히기 위해 대기온도 실측을 통한 연구가 진행되어 왔다. Cho *et al.*(2009)은 식재지, 수면, 초지를 기온저감요인으로 분류하였고, 초지보다 식재지의 기온저감효과가 크다고 보고하였다. Jo and Ahn(2009)은 식생체적이 10% 증가하면 대기온도가 0.08℃씩 감소함을 밝혔고, Ki *et al.*(2012)은 도심공원에서 녹지용적계수는 온도와 음의 상관관계임을 밝혔다. Jung(2014)은 서울시 가로수를 대상으로 한 연구에서 침엽수보다 활엽수의 온도저감 효과가 높다고 보고하였다. 식물은 증산작용을 통해 주변의 열을 흡수하여 저온을 유지하며, 열은 고온역에서 저온역으로 이동함에 따라 녹지 주변지역의 기온을 저감시킨다(Kim and Kim, 2002). 따라서 다양한 녹지 유형별 온도 특성을 밝히고, 온도 차이를 발생시키는 녹지의 세부적인 속성을 규명하는 것은 기온저감에 효과적인 도시녹지 조성을 위해 의미가 있다.

위성영상의 활용은 광범위한 지역의 표면온도 분포와 시계열변화 연구에 효과적이다(Hong *et al.*, 2005). 그러나 해상도가 낮아 도시의 복잡한 미기후적 특성을 반영하기에 한계가 있으며, 촬영시기가 한정되고 기상상태에 민감하여 자료의 취득이 비교적 용이하지 않다. 최근 고해상도의 영상 취득이 가능하며, 시·공간적 제약이 덜한 무인항공기(UAV)의 활용이 증가하고 있는데(Lee *et al.*, 2015), 다양한 센서의 탑재가 가능하여 소규모 지역의 정밀한 공간정보 취득이 용이해졌다. UAV를 활용한 연구는 그간 위성이나 항공영상을 토대로 작성되었던 토지피복분류나 농업분야 모니터링 등 다양한 분야에서 진행되고 있으며, 국내는 도입초기로서 각 분야에서 UAV 활용가능성에 대한 연구가 진행되고 있다(Moon *et al.*, 2017).

본 연구는 그간의 도시열섬 관련 연구에서 활용되어온 위성영상이 가진 한계에 대응하여 고해상도의 UAV 영상으로 확보한 정밀한 공간자료를 통해 도시 내 녹지공간의 표면온도 특성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 도시열섬에 취약한 시가지 내 고립된 녹지인 전북 익산의 소라산 자연마당을 대상으로 하여 녹지의 다양한 공간 유형 및 속성에 따른 표면온도 특성을 분석하였다. 이는 기존의 m단위 해상도의 위성영상을 통한 광역수준의 결과제시가 아닌 cm단위의 고해상도 공간정보를 통한 도시 내 소규모 녹지공간에 대한 정밀한 표면온도 분석 결과 제시라는 차별성이 있다. 또한 녹지의 세부적 특성과 표면온도 정보를 토대로 녹지가 지닌 온도특성을 규명함으로써 도시열섬에 효과적으로 대응하기 위한 도시녹지의 계획 및 조성 시 활용 가능한 기초자료로서 의미가 있을 것이다.

연구방법

1. 연구대상지

연구대상지는 전라북도 익산시에 위치한 소라산 자연마당(35° 57' 10.89" N, 126° 58' 1.39" E)이다(그림 1). 소라산 자연마당은 시가지 지역에 둘러싸여 고립된 소규모 잔존산림에 위치하며 자연마당 조성 전 주로 경작지로 이용되었고, 일부 공업지, 주거지 등이 분포하였다(그림 2). 2015년에 자연마당이 조성(면적 55,000 m²)되면서 잔존 산림과 연계된 숲 복원을 위해 넓은 면적에 수목을 식재하였고, 경작지 이용시 사용되던 수계를 활용하여 습지와 계류를 조성하였다. 도심 내 고립된 잔존산림에 인접하여 식재지와 수계, 이용시설지 등 다양한 공간 유형이 조성된 소라산 자연마당은 도시열섬에 대응한 녹지의 온도저감 기능 파악을 위한 적절한 대상지로 판단되었다.

2. UAV 영상자료 수집 및 분석

UAV 영상은 토지피복 및 식생현황도 작성, DTM(Digital Terrain Model), DSM(Digital



FIGURE 1. Location map of survey site(red dot)
(Source: Esri, 2017)

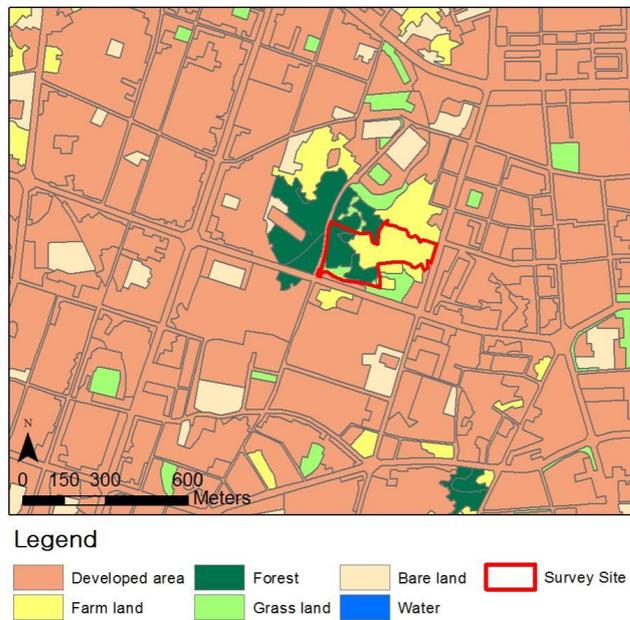


FIGURE 2. Land cover map of survey site
(Source: Ministry of Environment, 2013)

Surface Model) 제작을 위한 컬러(RGB) 영상과 표면온도 분석을 위한 열적외선(TIR) 영상을 촬영하였다. 무인항공기는 senseFly사의 eBee(고정익)를 사용하였고, 촬영 센서는 SONY DSC-WX200(RGB)과 eBee thermoMAP(TIR)을 활용하였다(표 1). 촬영영상의 공간해상도(GSD)는 RGB 영상 5cm, TIR 영상 31.5cm이었다. eBee 비행은 전용 프로그램인 eMotion2를 사용하여 자동 비행 후, 기체로부터 수집된 좌표정보를

이미지에 삽입하였다.

영상의 모자이크 처리과정은 지상기준점이 필요 없는 SIFT방식에 의해 수행되었는데, 실시간으로 측정된 기체의 자세정보와 스테레오 영상으로부터 외부표점요소를 추정한 후, tie point를 자동 생성하여 최종적인 정사영상을 제작하였다(Moon *et al.*, 2017)(그림 3). TIR 영상의 처리는 Pix4D에서 제공하는 변환식에 따라 영상의 DN값을 섭씨온도로 변환하였다. 촬영된

TABLE 1. Features of UAV and thermoMAP camera

	Items	Features
UAV	Weight	Approx. 0.69kg
	Wingspan	96cm
	Maximum flight time	50 minutes
	RGB camera	SONY-WX(18.2MP)
	Ground Sampling Distance(GSD)	Down to 1.5cm per pixel
thermoMAP	Image size	640×512 pixels
	Scene temperature	-40°C~160°C
	Temperature resolution	0.1°C
	Temperature calibration	Automatic, in-flight
	Operating altitude	50~150m



FIGURE 3. RGB image of survey site

영상의 접합, 섭씨온도 변환, DTM, DSM 제작은 Pix4Dmapper와 PhotoScan Professional을 사용하였다. TIR 영상에서 도출된 온도정보는 지표면에서 방사되는 적외선 복사를 측정된 표면온도이며, 대상지의 정확한 온도 측정보다는 온도의 상대적 비교와 공간상의 열 분포 패턴 등을 분석하는 데 이용되고 있다(Park and Jung, 1999). 보다 정확한 온도값 산출을 위해서는 방사율을 적용해야하나 본 연구는 대상지의 방사율 추정 및 적용과정을 거치지 않았다.

RGB 영상 촬영은 우선적인 대상지 현황 분석을 위해 수목의 잎 생장이 진행된 2016년 6월 17일 12~13시, 구름 없는 맑은 날씨에 실시하였다. TIR 영상은 고온 환경에서 녹지의 온도 특성을 파악하기 위하여 연중 기온이 가

장 높은 시기이면서 하루 중 기온이 가장 높은 시간대인 8월 18일 14~15시에 촬영하였다. TIR 촬영 당시 날씨는 열은 구름이 낀 상태였고, 익산 시가지 외곽에 위치한 기상청 AWS (Automatic Weather System) 관측기록 상 촬영 당일의 최고기온은 34.8°C, 13~16시까지 평균기온은 34.2°C이었다. 촬영 일을 중심으로 한 7일간 일 최고기온의 평균은 35.0°C로 일별 온도편차가 적은 고온의 기상상태가 지속된 시기이었다. 대상지에 설치한 기상측정장치의 관측기록에서는 촬영일인 18일의 최고기온이 36.3°C, 13~16시까지 평균기온이 35.8°C로 익산시 기상청 AWS 기록보다 높았다(표 2, 그림 4). 이는 도시 내부에 위치한 연구대상지의 대기온도가 외곽에 비해 높은 도시열섬 효과가 실제 발현된 결과로 판단되었다.

TABLE 2. Comparison of internal and external temperature of built up area, Iksan on 18th August

Division		Temperature(°C)	Difference(°C)
Daily maximum	Internal	36.3	1.5
	External	34.8	
Mean (13:00~16:00)	Internal	35.8	1.6
	External	34.2	

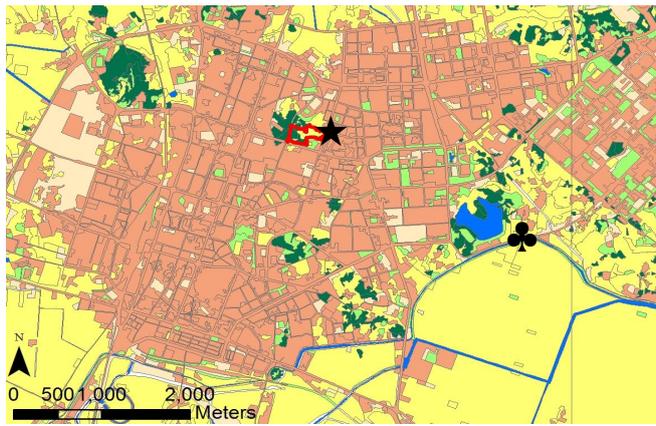


FIGURE 4. Internal and external location of AWS in built up area, Iksan(★: Internal, ♣: External)
(Legend and source are same as figure 2)

3. 토지피복 및 식생유형 분석

토지피복 및 식생유형 분석은 UAV로 촬영된 RGB 영상과 1:5,000 수치지도를 중첩하여 중이지도로 출력 후 현장조사를 통해 유형을 구분하였다. 조사자료는 AutoCAD Map 3D 2013을 이용해 공간구획 자료를 디지털화하였고, Excel 2013으로 속성자료를 입력한 뒤, ArcMap 10.3으로 병합하여 공간지도로 작성하였다. 토지피복 유형은 환경부 토지피복도 분류체계의 대분류 기준에 기초하여 대상지 내에서 확인되는 산림, 조경수식재지, 초지, 습지, 포장지의 5가지 유형으로 구분하였다. 식생유형은 토지피복에서 구분한 산림과 조경수식재지 각 유형 내에서 잎의 형태적 특성에 따른 표면온도 차이를 분석하기 위해 침엽수와 활엽수로 세분화하였고, 초지 유형에서 용적이 따른 표면온도 차이를 분석하기 위해 수고 1m를 기준으로 장초지와 단초지로 구분하였다.

4. 토지피복 및 식생유형별 표면온도 분석

유형별 표면온도 차이 분석은 토지피복 및 식생현황도와 TIR 영상을 섭씨온도로 변환한 표면온도 지도를 중첩하여 각 유형을 구성하는 단위 cell(1m×1m)당 표면온도 값을 추출하였고, 일원분산분석(One-Way ANOVA)을 실시하여 유형별 표면온도의 평균값 비교를 실시하였다. 분산분석 시 분산의 동질성 검정(Levene's test) 결과 등분산이 가정되지 않아(p=.000) Welch ANOVA 분석을 실시하였고, Games-Howell 사후검정을 통해 유형간 평균차이를 확인하였다.

5. 산림 수종유형별 표면온도 및 녹지용적과의 상관관계 분석

산림 수종유형별 표면온도 차이는 산림 수종 중 분포면적이 넓고 조밀하게 수관을 형성한 영역

중에서 단일수종으로 구성된 소나무림과 아까시나무림, 그리고 산뽕나무가 우점하며 상수리나무, 밤나무 등이 동반 출현하는 활엽수혼효림의 3가지 유형을 선별하여 전술한 방법과 동일하게 일원분산분석(One-Way ANOVA)을 실시하였다.

산림 수종유형별 용적과 표면온도의 관계 분석은 소나무림, 아까시나무림, 활엽수혼효림의 3개 유형별로 단위 cell(1m×1m)당 용적과 표면온도의 상관관계(Pearson Correlation) 분석을 실시하였다. 본 연구에서 녹지용적은 단위 cell당 DHM(Digital Height Model) 값(DHM/m²)으로 산출하였다. 이는 무인항공기로 촬영된 대상지의 스테레오 영상(RGB)을 통해 생성된 Point Cloud에서 DSM과 DTM을 추출하여 이들의 차이 값을 단위 cell당 높이 값으로 산정한 것이다(Davis *et al.*, 2016). 이상의 공간자료 처리와 통계분석은 ArcMap 10.3, IBM SPSS 2.2를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 표면온도 특성

UAV로 촬영한 TIR 영상을 활용하여 대상지 내부의 표면온도를 분석한 결과 표면온도는 평

균 40.19℃, 표준편차 4.33℃이었고, 최저 32.2℃에서 최고 68.3℃ 사이에 분포하였다. 대상지에 설치한 기상관측장비의 동시간대 대기온도 관측기록(13~16시 평균 35.8℃)과 비교하여 표면온도가 높게 분포하였다. 표면온도를 Natural Breaks(Jenks, 1967) 방식으로 8개 class로 구분하여 확인한 결과 32.2~39.3℃의 저온영역이 전체의 58.7%로 대상지 외곽의 기존 산림과 습지를 중심으로 넓은 면적을 차지하였고, 44.5℃를 넘는 상대적으로 고온인 영역은 15.2%로 대상지 내부에 포장지 및 주변 식재지를 중심으로 소규모 분포하였다(표 3; 그림 5).

TABLE 3. Status of surface temperature

Surface Temp.(℃)	Area(m ²)	Ratio(%)	M±SD
32.2 ~ 37.3	13,090	23.8	36.57±0.55
37.3 ~ 39.3	19,195	34.9	38.19±0.53
39.3 ~ 41.9	8,800	16.0	40.42±0.73
41.9 ~ 44.5	5,555	10.1	43.14±0.79
44.5 ~ 47.5	4,015	7.3	45.89±0.84
47.5 ~ 50.8	2,420	4.4	49.01±0.94
50.8 ~ 55.6	1,430	2.6	52.45±1.25
55.6 ~ 68.3	495	0.9	58.71±2.14
Total	55,000	100.0	40.19±4.33

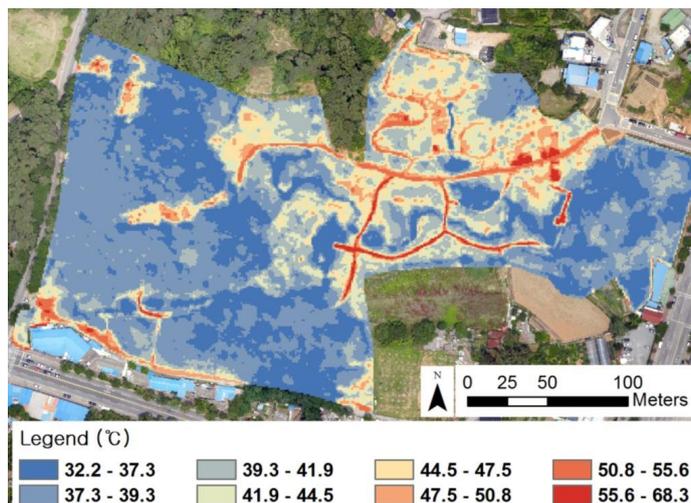


FIGURE 5. Surface temperature map of survey site

2. 토지피복 및 식생유형

토지피복 및 식생유형 분석결과 토지피복 유형의 분포비율은 산림(33.1%), 조경수식재지(30.3%), 습지(16.9%), 초지(9.9%), 포장지(4.0%) 순이었다. 전체비율합계가 94.2%로 대상지 중 녹지에 가려지거나 시설이 크게 들어선 포장지역은 분석영역에서 제외하였다. 식생유형으로 세분한 결과 산림 침엽과 활엽이 각각 19.4%, 13.7% 비율로 분포하였고, 조경수식재지의 침엽과 활엽은 각각 16.3%, 14.0%,

초지를 세분한 장초지와 단초지는 각각 4.1%, 5.7%이었다(표 4). 산림은 주로 대상지 서측과 남측 외곽에 넓게 위치하였고, 습지는 서측 산림에서 좁은 계류형태로 동측으로 흘러 대상지 중앙 습지를 거쳐 동측 경계부에 있는 넓은 습지까지 이어진 형태로 조성되었다. 습지 인접지역과 산림 내 일부지역에 초지가 위치하였고, 조경수식재지는 습지 주변에서 산림 인접부까지 넓게 분포하였다. 포장지는 주로 산책로를 따라 위치하였다(그림 6).

TABLE 4. Area and ratio of survey site by spatial type

Land cover type	Vegetation type	Area(m ²)	Ratio(%)
A. Forest	A1. Conifer	10,644	19.4
	A2. Broad-leaved	7,539	13.7
	Subtotal	18,183	33.1
B. Planting area	B1. Conifer	8,992	16.3
	B2. Broad-leaved	7,673	14.0
	Subtotal	16,666	30.3
C. Grass	C1. Long	2,270	4.1
	C2. Short	3,155	5.7
	Subtotal	5,425	9.9
D. Wetland		9,306	16.9
E. Paving		2,223	4.0
Total		51,802	94.2

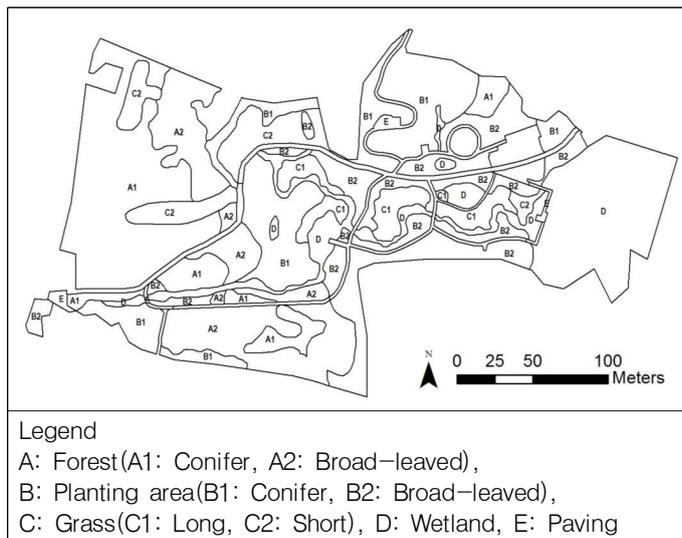


FIGURE 6. Status map of land cover & vegetation type

3. 토지피복 및 식생유형별 표면온도

1) 토지피복유형별 표면온도

토지피복유형에 따른 표면온도 분석결과 유형별 평균 표면온도가 저온의 습지(37.52°C)에서부터 산림(37.69°C), 조경수식재지(41.63°C), 초지(42.46°C), 고온의 포장지(51.20°C) 순으로 확인되었다. 분산분석(Welch ANOVA) 결과 F통계량에 대한 유의확률이 .000으로 유형별 표면온도 평균값에 통계적으로 유의한 차이가 있음이 인정되었다. 사후검정을 통한 유형간 표면온도 차이를 확인한 결과 저온역인 습지와 산림은 평균값 차이가 0.17°C(p=.000)로 미미하였으나, 산림은 조경수식재지에 비해 3.94°C(p=.000) 낮은 유의한 차이가 있었다. 조경수식재지는 초지에 비해 0.82°C(p=.000) 낮은 차이가 있었고, 초지는 포장지와 8.74°C(p=.000)의 큰 차이를 보였다(표 5). 이상의 분석 결과 도시 내 습지와 산림은 도시열섬에 대응한 저온역으로서 가치가 우수하였고, 포장지는 녹지에 비해 표면온도가 큰 폭으로 차이나는 고온역으로 확인되었다. 기존 연구에서 식재지는 초지보다 기온 저감에 효과적인 것으로 보고되고 있으나(Myint *et al.*, 2013; Davis *et al.*, 2016), 연구대상지의 조경수식재지 표면온도가 비교적 높고 초지와 차이가 작은 것은 식재 초기상태로서 조경수의 수관이 완전하게 형성되지 않았기 때문으로 판단되었다.

2) 식생유형별 표면온도

식생유형에 따른 표면온도 분석결과 유형별 평균 표면온도는 침엽수 산림이 38.03°C, 활엽수 산림이 37.19°C이었고, 조경수식재지는 침엽

수와 활엽수가 각각 41.44°C, 41.90°C이었다. 장초지는 41.28°C, 단초지는 43.24°C이었다. 분산분석(Welch ANOVA) 결과 F통계량에 대한 유의확률이 .000으로 유형별 표면온도 평균값에 통계적으로 유의한 차이가 있음이 인정되었다. 사후검정을 통한 유형간 표면온도 차이를 확인한 결과 저온역인 산림 내 활엽수는 침엽수보다 0.84°C(p=.000) 낮은 유의한 차이가 있었다. 침엽수 산림은 장초지보다 3.25°C(p=.000) 낮았고, 장초지는 침엽 조경수보다 미미하게 낮았으나(0.16°C(p=.234)) 통계적 유의성은 인정되지 않았다. 조경수식재지 내 침엽수는 활엽수보다 0.62°C(p=.000) 낮은 것으로 확인되었고, 활엽 조경수는 단초지보다 1.34°C(p=.000) 낮았다(표 6). 이상의 분석 결과 산림 내 침엽수와 활엽수 간 차이는 기존 연구(Kim, 2004; von Arx *et al.*, 2012)와 유사하게 활엽수가 다소 낮은 것이 확인되었으나, 조경수식재지에서는 침엽수가 더 낮은 반대의 결과가 확인되었다. An(2015)은 침엽수와 활엽수간 온도 차이에 대해 숲 내부 온도는 활엽수의 저감 효과가 크지만 표면온도의 경우 어느 한쪽의 우세함을 밝히기 힘든 미세한 차이만이 있음을 보고하였다. 따라서 침엽수와 활엽수간의 온도저감 기능 차이는 지속적인 연구를 통한 규명이 필요하였다. 조경수식재지는 장초지의 표면온도 보다 더 높은 것으로 나타났는데, 이는 역시 식재 초기인 조경수의 미약한 수관발달이 원인인 것으로 판단되었다. 산림 활엽수 표면온도 평균값은 앞서 분석된 습지 평균값보다 낮아 저온역으로서 기능이 가장 우수하였고, 단초지보다 장초지의 표면온도가 낮은 결과에 따라 초지의 용적이 표면온도에 영

TABLE 5. ANOVA result of surface temperature by land cover type

Type	Surface Temp.(°C) M±SD	Welch ANOVA	Games-Howell post hoc test (Mean difference, Sig.)(p<0.01)
A. Forest	37.69±0.92	F ^a =12055.02 p=0.000	E>C(8.74, .000)
B. Planting area	41.63±3.20		C>B(0.82, .000)
C. Grass	42.46±3.48		B>A(3.94, .000)
D. Wetland	37.52±1.43		A>D(0.17, .000)
E. Paving	51.20±4.48		

a. Asymptotically F distributed.

TABLE 6. ANOVA result of surface temperature by vegetation type

Type	Surface Temp.(°C) M±SD	Welch ANOVA	Games-Howell post hoc test (Mean difference, Sig.)(p<0.01)
A1. Conifer forest	38.03±0.76	F ^a =6257.15 p=0.000	C2>B2(1.34, .000) B2>B1(0.62, .000) B1>C1(0.16, .234) C1>A1(3.25, .000) A1>A2(0.84, .000)
A2. Broad-leaved forest	37.19±0.91		
B1. Conifer planting area	41.44±3.21		
B2. Broad-leaved planting area	41.90±3.16		
C1. Long grass	41.28±2.67		
C2. Short grass	43.24±3.72		

a. Asymptotically F distributed.

향을 끼치는 것으로 사료되었다.

4. 산림 수종유형별 표면온도 및 녹지용적과의 상관관계

1) 산림 수종유형별 표면온도

산림 수종유형에 따른 표면온도 분석을 위하여 대상지 산림 중 선별 추출한 3가지 유형은 소나무림, 아까시나무림, 활엽수혼효림으로 면적은 각각 2,608m², 493m², 691m²이었다. 유형별 평균 표면온도 분석결과 소나무림은 38.14°C, 아까시나무림은 37.01°C, 활엽수혼효림은 37.19°C이었다. 분산분석(Welch ANOVA) 결과 F통계량에 대한 유의확률이 .000으로 유형별 표면온도 평균값에 통계적으로 유의한 차이가 있음이 인정되었다. 사후검정을 통한 유형간 표면온도 차이를 확인한 결과 아까시나무림은 활엽수혼효림보다 0.18°C(p=.000) 낮았고, 활엽수혼효림은 소나무림보다 0.94°C(p=.000) 낮은 유의한 차이가 확인되었다(표 7). 침엽수인 소나무림보다 활엽수인 아까시나무림과 활엽수혼효림의 표면온도가 낮게 나타나 산림 내 활엽수가 침엽수보다 낮은 앞선 분석결과와 같은 결과를 확인하였다. 산림 활엽수간 비교에서

는 아까시나무림이 미세한 차이로 더 낮았는데, 후속 연구를 통해 다양한 수종간 표면온도 차이에 대한 규명이 필요하다.

2) 산림 수종유형별 표면온도와 녹지용적의 상관관계

산림 수종유형별 녹지용적과 표면온도의 상관관계 분석결과 0.01 유의수준에서 소나무림은 Pearson 상관계수 -.417(p=.000), 활엽수혼효림은 -.466(p=.000)인 음의상관관계가 확인되었다. 이는 녹지용적 증가에 따라 표면온도가 감소한다는 기존 연구결과(Hong *et al.*, 2005; Jo and Ahn, 2009; Ki *et al.*, 2012)와 유사하였다. 그러나 아까시나무림은 Pearson 상관계수 +.181(p=.000)로 용적 증가에 따라 미세하게 표면온도가 상승하는 약한 양의상관관계가 확인되었다(표 8). 식물은 증산작용과 열 저장 능력을 가지며(Gallo *et al.*, 1993), 그늘을 형성하여 온도에 영향 주기 때문에(Skelhorn *et al.*, 2014), 일반적으로 녹지의 양적 증가는 온도저감 효과를 높일 것으로 기대하게 된다. 그러나 본 연구결과 수종에 따라 용적의 증가가 표면온도를 감소시키지 않을 수도 있음을

TABLE 7. ANOVA result of surface temperature by forest species type

Type	Surface Temp.(°C) M±SD	Welch ANOVA	Games-Howell post hoc test (Mean difference, Sig.)(p<0.01)
A11. Pinus densiflora forest	38.14±0.52	F ^a =1681.42 p=0.000	A11>B22(0.94, .000) B22>B21(0.18, .000)
B21. Robinia pseudoacacia forest	37.01±0.44		
B22. Mixed broad-leaved forest	37.19±0.63		

a. Asymptotically F distributed.

TABLE 8. Correlation between the vegetation volume and surface temperature by forest species type

Type	A11. <i>Pinus densiflora</i> forest	B21. <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	B22. Mixed broad-leaved forest
Vegetation volume(DHM/m ²) M±SD	14.35±1.73	13.27±1.92	12.54±1.89
Surface Temp.(°C) M±SD	38.14±0.52	37.01±0.44	37.19±0.63
Pearson coefficient	-.417**	.181**	-.466**
Sig.(2-tailed)	.000	.000	.000
N	2612	485	693

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

확인하였다. 따라서 다양한 수종을 대상으로 한 지속적인 연구를 통해 용적과 온도의 관계에 대한 규명이 필요하다.

결론 및 제언

고해상도 UAV 영상을 활용해 소라산 자연마당의 다양한 녹지유형 및 속성에 따른 표면온도 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 31.5cm급의 TIR 영상을 활용한 표면온도 분석결과 표면온도 평균은 40.19°C이었고, 32.2~68.3°C 사이에 분포하였다. 이는 대상지 기상관측기록 상 동시간대 대기온도(13~16시 평균 35.8°C)와 비교하여 높은 수준이었다. 표면온도의 공간분포는 32.2~39.3°C의 저온역이 전체의 58.7%로 기존 산림과 습지를 중심으로 분포하였고, 44.5°C를 넘는 고온역은 15.2%로 자연마당 중점 조성지역을 중심으로 분포하였다.

둘째, 5cm급 RGB 영상을 토대로 공간유형을 구분한 결과 토지피복은 산림(33.1%), 조경수식재지(30.3%), 습지(16.9%), 초지(9.9%), 포장지(4.0%)의 5개 유형, 식생유형은 산림 내 침엽(19.4%)과 활엽(13.7%), 조경수식재지 내 침엽(16.3%)과 활엽(14.0%), 장초지(4.1%), 단초지(5.7%) 6개 유형으로 구분되었다.

셋째, 유형별 표면온도 차이 분석결과 토지피복 유형은 저온역인 습지에서 산림, 조경수식재

지, 초지, 포장지로 갈수록 온도가 높았다. 습지와 산림은 저온역으로서 가치가 높았다. 초지에 비해 식재지의 온도저감 효과가 높다는 기존 연구결과와 달리 조경수식재지와 초지는 온도차가 적었다. 그러나 이는 수관발달이 덜 된 식재 초기상태인 것이 원인으로 추정되어 향후 개선될 것으로 기대되었다. 포장지는 표면온도가 월등히 높은 온도증감 요인으로서 도심녹지 조성 시 지양될 필요가 있었다. 식생유형별 차이에서는 저온역인 활엽수산림에서 침엽수산림, 장초지, 조경수 침엽, 조경수 활엽, 단초지로 갈수록 온도가 증가하였다. 산림 내 활엽수와 침엽수는 활엽수의 온도가 낮아 기존 연구결과와 유사하였다. 조경수식재지 내 활엽수와 침엽수에서는 침엽수의 온도가 낮은 반대의 결과가 확인되어 추가적인 연구가 필요하였다. 장초지는 조경수식재지보다 표면온도가 낮은 결과가 도출되어 조경수식재지의 미약한 수관발달이 원인인 것으로 판단되었고, 단초지의 표면온도가 가장 높아 초지의 용적이 온도저감에 중요한 요인인 것으로 판단되었다.

넷째, 산림수종유형별 표면온도 차이 분석결과 침엽수인 소나무림보다 활엽수인 아까시나무림과 활엽수혼효림의 표면온도가 낮게 나타나 침엽수보다 활엽수의 온도가 낮은 기존 결과와 같았다. 활엽수혼효림과 아까시나무림은 미세한 표면온도 차이가 확인되어 다양한 수종간 표면온도 차이에 대한 후속연구가 필요할

것으로 사료되었다. 산림 수종유형별 녹지용적과 표면온도의 상관관계 분석결과 소나무림과 활엽수혼효림에서는 기존 연구결과와 유사하게 녹지용적의 증가에 따라 표면온도가 감소하는 음의상관관계가 확인되었다. 그러나 아까시나무림은 용적의 증가에 따라 미세하게 표면온도가 상승하는 약한 양의상관관계가 확인되어 수종에 따라 용적 증가가 표면온도를 감소시키지 않을 수도 있음을 확인하였다. 따라서 향후 다양한 수종을 대상으로 한 용적과 온도의 관계에 관한 연구가 지속될 필요가 있다.

본 연구는 도심온도 저감을 위한 녹지의 기능을 규명하기 위하여 여름철 고온 시간대에 도심 녹지공간이 지닌 표면온도 특성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 고해상도의 UAV 영상을 활용한 정밀한 공간자료를 취득하여 녹지의 다양한 유형과 속성에 따른 표면온도 차이를 분석하였다. 그러나 도심온도에 영향을 끼치는 요인은 매우 복잡하고 다양하기 때문에 단일 촬영된 표면온도 영상을 통한 연구결과로 특성을 일반화하기 어렵다. 제시된 결과는 특정 도시 내 소규모 녹지를 대상으로 하였기 때문에 국내 모든 도시녹지에 대한 대표성을 갖기 힘들며, 순간 측정된 표면온도 하나로만 도출된 결과라는 한계가 있다. 따라서 다양한 지역의 녹지와 시간대를 고려한 연구가 필요하다. 특히 본 연구에서 제시된 침엽수와 활엽수간의 차이, 용적과 온도의 관계, 수종별 차이 등 녹지가 지닌 세부적인 속성과 온도의 관계는 정밀한 공간자료를 활용한 후속적인 연구가 지속되어야 하겠다. 추가적으로 그간 위성영상분석이나 모델링 방법으로 연구되어왔던 녹지가 갖는 주변 지역의 열 저감효과나 주변 인공적 요소가 녹지의 온도에 끼치는 영향 등에 관한 연구도 정밀한 공간자료 취득을 통한 규명이 필요할 것이다. 향후 관련 자료가 누적되면 도시기온 저감에 효과적인 녹지공간의 특성을 밝혀 도시열섬에 대응한 녹지공간 계획에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 

REFERENCES

- An, M.Y. 2015. Relationship between changing vegetation type and temperature in urban forest. Master's Thesis, Pusan Nat'l Univ. p.62 (안미연. 2015. 도시산림 식생유형변화와 온도 관계 연구. 부산대학교 석사학위논문. 62쪽).
- Bowler, D.E., L. Buyung-Ali, T.M. Knight, and A.S. Pullin. 2010. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* 97(3):147-155.
- Cho, S.M., Y.H. Yoon, E.R. Ryu, B.J. Park, and W.T. Kim. 2009. The influence of land cover and zoning on the urban heat island in Cheongju. *Journal of the Environmental Sciences* 18(2):169-176 (조성모, 윤용한, 류을렬, 박봉주, 김원태. 2009. 도시내 용도지역의 토지피복형태가 열섬현상에 미치는 영향. *한국환경과학학회지* 18(2):169-176).
- Davis, A.Y., J. Jung, B.C. Pijanowski, and E.S. Minor. 2016. Combined vegetation volume and "greenness" affect urban air temperature. *Applied Geography* 71:106-114.
- Esri. 2017. World topographic map. Available at: <https://www.arcgis.com> (Accessed July 14, 2017).
- Gallo, K.P., A.L. McNab, T.R. Karl, J.F. Brown, J.J. Hood, and J.D. Tarpley. 1993. The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing* 14(11):2223-2230.
- Hong, S.H. 2013. Cause analysis of the rising temperature in mixed city of urban and rural area: case of Miryang city, Kyongsangnamdo. *Korean Journal of*

- Environment and Ecology 27(6):757-764 (홍석환. 2013. 도농복합도시 온도상승 영향 요인 분석-경남 밀양시를 대상으로-. 한국환경생태학회지 27(6):757-764).
- Hong, S.H., K.J. Lee, and B.H. Han. 2005. Analysis of temperature profiles by land use and green structure on built-up area. Korean Journal of Environment and Ecology 19(4):375-384 (홍석환, 이경재, 한봉호. 2005. 시가화지역 토지이용 및 녹지구조에 따른 온도변화 연구. 한국환경생태학회지 19(4):375-384).
- Hutcheon, R.J., R.H. Johnson, W.P. Lowry, C.H. Black, and D. Hadley. 1967. Observations of urban heat island in a small city. Bulletin of the American Meteorological Society 48:7-8.
- Imhoff, M.L., P. Zhang, R.E. Wolfe, and L. Bounoua. 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. Remote Sensing of Environment 114(3):504-513.
- Jenks, G.F. 1967. The data model concept in statistical mapping. International Yearbook of Cartography 7:186-190.
- Jo, H.K. and T.W. Ahn. 2009. Impacts of three-dimensional land cover on urban air temperatures. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 37(3):54-60 (조현길, 안태원. 2009. 도시기온에 작용하는 입체적 토지피복의 영향. 한국조경학회지 37(3):54-60).
- Jung, H.E. 2014. A study on the temperature reduction effect and functional improvement of street green area in Seoul, Korea. Master's Thesis, Univ. of Seoul. p.86 (정희은. 2014. 서울 도심 가로수 및 가로녹지의 온도 저감 효과와 기능 향상 연구. 서울시립대학교 석사학위논문. 86쪽).
- Ki, K.S., B.H. Han, and J.Y. Hur. 2012. A study of factors influencing of temperature according to the land cover and planting structure in the city park. Korean Journal of Environment and Ecology 26(5):801-811 (기경석, 한봉호, 허지연. 2012. 도시공원의 토지피복 및 식재구조에 따른 온도 영향요인 규명 연구 -성남시 분당구 중앙공원을 사례로-. 한국환경생태학회지 26(5):801-811).
- Ki, K.S. and K.J. Lee. 2009. A study on temperature change profiles by land use and land cover changes of paddy fields in metropolitan areas. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 37(1):18-27 (기경석, 이경재. 2009. 대도시 외곽지역 논경작지의 토지이용 및 피복변화에 따른 온도 변화모형 연구. 한국조경학회지 37(1):18-27).
- Kim, S.B. and H.D. Kim. 2002. Influences of urban trees on the control of the temperature. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 30(3):25-34 (김수봉, 김해동. 2002. 도시의 수목이 기온의 조절에 미치는 영향. 한국조경학회지 30(3):25-34).
- Kim, Y.P. 2004. A study on temperatures distribution of forest type class using Landsat TM. Journal of the Korean Institute of Forest Recreation 8(3):11-17 (김영표. 2004. LANDSAT TM 위성영상을 이용한 임상별 온도분포연구. 한국산림휴양학회지 8(3):11-17).
- Landsberg, H.E. 1981. The urban climate. Academic Press, New York. p.275.
- Lee, G.S., Y.W. Choi, K. Jung, and G.S. Cho. 2015. Analysis of the spatial information accuracy according to photographing direction of fixed wing. Journal of the Kor-

- ean Association of Geographic Information Studies 17(3):141-149 (이근상, 최연웅, 정관수, 조기성. 2015. 고정익 UAV의 촬영방향에 따른 DEM 및 정사영상 제작 정확도 분석. 한국지리정보학회지 17(3):141-149).
- Lee, W.S., S.G. Jung, K.H. Park, and K.T. Kim. 2010. Analysis of urban thermal environment for environment-friendly spatial plan. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 13(1):142-154 (이우성, 정성관, 박경훈, 김경태. 2010. 친환경적 공간계획을 위한 도시의 열환경 분석. 한국지리정보학회지 13(1):142-154).
- Ministry of Environment. 2013. Land cover map. Available at: <https://egis.me.go.kr> (Accessed July 13, 2017).
- Montavez, J.P., A. Rodriguez, and J.I. Jimenez. 2000. A study of the urban heat island of Granada. International Journal of Climatology 20:899-911.
- Moon, H.G., S.M. Lee, and J.G. Cha. 2017. Land cover classification using UAV imagery and object-based image analysis -focusing on the Maseo-myeon, Seoch-eon-gun, Chungcheongnam-do-. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 20(1):1-14 (문호경, 이선미, 차재규. 2017. UAV와 객체기반 영상분석 기법을 활용한 토지피복 분류 -충청남도 서천군 마서면 일원을 대상으로-. 한국지리정보학회지 20(1):1-14).
- Myint, S.W., E.A. Wentz, A.J. Brazel, and D.A. Quattrochi. 2013. The impact of distinct anthropogenic and vegetation features on urban warming. Landscape Ecology 28(5):959-978.
- Oke, T.R. 1973. City size and urban heat island. Atmospheric Environment 7(8):769-779.
- Olfe, D.B. and R.L. Lee. 1971. Linearized calculations of urban heat island convection effects. Journal of the Atmospheric Sciences 28(8): 1374-1388.
- Park, K.H. and S.K. Jung. 1999. Analysis on urban heat island effects for the metropolitan green space planning. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 2(3):35-45 (박경훈, 정성관. 1999. 광역적 녹지계획 수립을 위한 도시열섬효과 분석. 한국지리정보학회지 2(3):35-45).
- Peng, S., S. Piao, P. Ciaia, P. Friedlingstein, C. Ottle, F.M. Breon, H. Nan, L. Zhou, and R.B. Myneni. 2012. Surface urban heat island across 419 global big cities. Environmental Science & Technology 46(2):696-703.
- Skelhorn, C., S. Lindley, and G. Levermore. 2014. The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: a fine scale assessment in Manchester UK. Landscape and Urban Planning 121:129-140.
- von Arx, G., M. Dobbertin, and M. Rebetez. 2012. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. Agricultural and Forest Meteorology 166-167:144-155.
- Voogt, J.A. and T.R. Oke. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. Remote sensing of environment 86:370-384.
- Watkins, R., J. Palmer, M. Kolokotroni, and P. Littlefair. 2002. The balance of the annual heating and cooling demand with in the London urban heat island. Building Service Engineering 23(4):207-213. 