Korean Journal of Remote Sensing, Vol.20, No.6, 2004, pp.397~408

공간정보기술을 활용한 도시지역 지표온도 분포 특성 해석

이광재* · 조명희**

한국항공우주연구원 위성운영센터*, 경일대학교 도시정보지적공학과**

Analysis of Urban Surface Temperature Distribution Properties Using Spatial Information Technologies

Kwang-Jae Lee* and Myung-Hee Jo**

Satellite Operation & Application Center, Korea Aerospace Research Institute*

Department of Urban Information & Cadastral Engineering, Kyungil University**

Abstract : In this study, surface temperature which was extracted from Landsat TM band 6 was compared and analyzed with the AWS(Automatic Weather System) observation data for studying urban heat environment properties with possibility of remote sensing data application. In order to verification of the distribution properties of urban surface temperature, correlation analysis between surface temperature and NDVI, the distribution properties of urban surface temperature by land use/cover patterns were carried out by GIS spatial analysis techniques. The results presented that the spatial distribution of urban surface temperature was very different depending on various land use/cover patterns of surrounding areas. Also there was the reverse linear relationship between surface temperature and NDVI. These results will be worked as one of the major factors for environmentally sustainable urban planning considering the characteristics of weather environments in the near future.

Key Words : Remote Sensing, Surface Temperature, Geographic Information System, Spatial Information Technology, Automatic Weather System.

요약 : 본 연구에서는 Landsat TM band 6으로부터 추정된 지표온도와 AWS(Automatic Weather System) 관측 자료를 비교, 분석함으로써 도시 열 환경 특성 연구에 있어 원격탐사 자료의 활용 가능성을 제시함과 동시에 지표온도와 식생지수(NDVI)의 상관관계 및 토지피복 유형별 지표온도의 분포 특성 등을 GIS 공간분석기법과 연계하여 도시 지표온도의 공간적 분포 특성을 규명하였다. 그 결과 도시 지표온도의 공간적 분포는 그 주변지역의 토지이용현황에 따라 그 패턴을 명확히 달리한다는 사실을 확인할 수 있었으며 지표온도와 식생 간에는 부(-)의 상관관계가 존재함을 확인할 수 있었다. 이는 향후 지속 가능한 도시개발계획 수립에 있어 그 기초 자료로 활용되어질 수 있을 것으로 판단된다.

2004년 6월 29일 접수 : 2004년 11월 12일 수리.

1. 서 론

오늘날 지구환경 문제가 점차 심각해짐에 따라 환경에 미치는 인간의 활동에 대한 관심이 한층 더 고조되는 한편 도시화와 더불어 나타나는 도시기후 변화에 대한 관심도 점차 높아지고 있는 실정이다. 한편 산업사회의 발달은 지속적인 도시인구 집중화 현상에 따라 도시주변에서는 대규모 도시개발로 인한 도시역의 확대로 지표면 피복 변화를 심각하게 발생시키고 있다. 이러한 인공적인 개발로 인하여 도시의 내·외적 경관변화 뿐만 아니라 지형 및 기온상승, 바람장의 변화 그리고 대기오염 물질의 증가 등 복합적인 국지기후 변화를 초래하게 되었다. 일반적으로 도시지역의 국지기후를 연구하기 위해서는 도시는 물론 그 주변지역에 이르기까지 조밀한 기상관측망이 요구된다. 국내의 경우 기온(현재, 최고, 최저), 평균습도, 풍향(현재, 최대), 풍속(현재, 최대), 강수유무, 강수량을 무인시스템으로 관측하여 그 결과를 전화선을 통하여 송신해주는 AWS(Automatic Weather System)를 기상청에서 운영/활용 중에 있다. AWS는 1930년대 극지 기후관측을 위해 처음 개발된 자동관측시스템으로 주로 일본과 우리나라 등지에서는 국지기상 감시용으로 사용되고 있으며, 우리나라는 1985년부터 시행된 기상업무 현대화 계획에 따라 1988년부터 설치하기 시작하였다. 그러나 서울, 대구, 부산의 사례를 살펴보면, 서울행정경계 안에만 모두 23대의 AWS가 설치되어 있을 뿐 대구 2대, 부산 8대로 이들 지상의 고정 기상관측 자료만으로 도시의 열 환경 특성을 효과적으로 분석하기에는 한계가 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 보다 많은 인적·물적 자원이 요구되고 있어 현실적으로 국지기후에 관하여 연구하려면 그 기초 자료부터 측정하여야 하는 어려움이 있다. 그러나 이와 같은 문제점의 인식과 연구의 필요성은 절감하면서도 실제적인 연구는 극히 부진하며 그 범위도 대단히 한정되어 있다.

최근 원격탐사기법의 발달로 인하여 지구의 복사평행이 일어나는 지표에서 물체의 반사 또는 복사 특성을 이용함으로써 도시기후변화의 원인에 보다 근본적으로 접근할 수 있게 되었다. 특히 90년대 이후에는 인공위성 센서가 많이 사용되어지고 있는데 이러한 원격탐사 기술을 이용한 위성영상 분석은 보다 광범위하고 동시적이며, 신속하게 도시 열 분포 특성의 감시 및 분석을 가능하게 할 뿐만 아니라 비용절감 및 미래의 예측까지도 가능하게 하였다. 또한 지리정보시스템(GIS: Geographic Information System)의 다양한 공간분석기법의 활용 가능성이 입증됨에 따라 이를 활용한 도시 열 분포 특성 규명에 있어서도 보다 체계적이고 효과적인 연구를 수행할 수 있게 되었다(이, 2002). 이와 같이 원격탐사기법과 GIS와 같은 종합적인 공간정보기술을 바탕으로 도시지역 열분포 특성 규명에 있어 지표에서 발생하는 단순한 현상 해석이 아닌 보다 과학적이고 시·공간적인 분석의 필요성이 대두되고 있으며 이를 위한 다양한 자료처리 및 분석 기법의 개발은 반드시 수반되어야할 과제로 간주되고 있다.

국내의 경우 열적외 원격탐사 자료를 활용한 도시열섬 현상에 관한 연구가 많이 선행되어졌는데 이(1989)는 원격탐사 자료를 이용한 도시열섬 연구의 가능성을 타진하여 보고자 NOAA AVHRR 영상을 이용하여 남한지역의 도시열섬 존재와 수도권지역 열섬의 강도 및 그 형태를 해석함과 동시에 도시열섬과 여러 도시현상간의 관계에 관하여 연구한바있으며, 이(1990)는 Landsat TM 영상을 이용하여 서울의 지표면 온도를 추출하고 이를 해석하는 한편 도시 내 토지이용에 따른 지표면 온도의 상이가 도시열섬의 형성에 어느 정도 절대적인 의미를 부여하는지 분산분석을 통하여 살펴본바 있다. 또한 박(1999)등은 경상북도 3개 도시를 대상으로 녹지지수와 지표온도와의 상관성을 분석하고 녹지의 활력에 따른 온도와의 경험적 회귀모델을 도출함으로써 각 지역의 열섬분포를 파악함과 동시에 지역 내 추이대의 기능을 분석하였으며, 양(1995)등은 Landsat TM 영상을 활용하여 난지도 매립지에서 발생하는 지표 열을

분석하는 한편 지점별 온도분포 해석을 통하여 동일한 지역에서의 온도변화를 해석하였다. 한편 기후특성을 고려한 도시계획 도입과 적용 가능성에 관한 연구도 수행되었는데 김(2001)등은 서울시를 대상으로 도시환경의 특성에 적합한 도시계획 수립을 위한 도시열섬, 시정거리, 시정장애 및 바람장에 관한 연구를 원격탐사 자료를 바탕으로 수행한바 있다.

한편 외국의 사례를 살펴보면, NOAA 영상자료를 이용한 식생지수와 표면온도의 상관성 분석을 통하여 지표면의 피복상태에 따른 온도분포의 추정 가능성에 관한 연구(Griend et al., 1993)를 비롯하여 동남아시아 지역의 지표화재 연구에 있어서 Landsat TM 자료를 이용한 화재 전·후의 지표온도 및 식생변화 연구 등이 수행된바 있다(Prakash *et al.*, 1999). 특히 Landsat ETM+ 영상자료를 활용한 연구가 많이 이루어졌는데, Yuzo et al.(2000)은 ETM+ 밴드 6을 활용하여 히로시마 연안지역의 지표온도 추출을 통한 열 환경 해석 연구를 수행하였으며, Chen *et al.*(2001)은 도시지역의 지표온도를 추출한 후 IKONOS 영상과의 자료 합성을 통하여 지표온도와 토지피복과의 상관성을 분석한바 있다. 또한 Lambin *et al.*(1996), Griend *et al.*(1993)의 연구에 의하면 방사된 지표온도는 표면의 수분함량 및 식생지수와 밀접한 관계가 있음을 보여주고 있는데 이와 같이 원격탐사 자료로부터 단순히 지표온도만을 추출하는데 그치지 않고 관련 인자와의 인과관계를 해석함과 동시에 이를 활용한 다양한 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서는 위성원격탐사와 GIS와 같은 종합적인 공간정보기술을 활용하여 우리나라 3대 대도시를 중심으로 지표온도, 토지피복 및 식생지수의 분포 특성을 지형인자와 함께 종합적으로 분석함으로써 도시지역 지표온도의 공간적 분포 특성을 시·공간적으로 해석하고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

본 연구에서는 도시열섬 현상과 같은 도시기후 문제가 많이 대두되었던 지역으로써 AWS 현지 관측 자료와 같은 기상 및 인문통계자료를 비롯하여 다중시기 위성영상 자료의 용이한 획득을 고려하여 서울, 대구, 부산지역을 연구대상 지역으로 선정하였다.

도시지역 지표온도 분포 특성을 보다 효과적으로 규명하고자 본 연구에서는 다중시기 Landsat TM 영상과 기상청이 운영하고 있는 AWS 시간대별 기온자료, 1:5,000 및 1:25,000 수치지도, 각 시에서 발행되는 통계연보 자료를 기본적으로 활용하였다(Table 1). 한편 Fig. 1에서와 같이 Landsat TM band 6으로부터 추출된 지표온도와의 비교·검증자료로 활용된 AWS자료의 경우 서울, 부산은 행정구역 안에 각각 23, 8개 지점이 있지만 대구의 경우 남구, 서구에만 설치되어 있어 경산, 하양, 왜관, 가산 등 대구 주변지역 8개

Table 1. Material used.

Data	Type	Purpose
AWS data & Statistical data	Seoul : 23 points Daegu : 10 points Busan : 8 points	- Comparison of Satellite-derived surface temperature
Digital maps	1:5,000 1:25,000	- GCP & Training sample - Generation of DEM, Aspect, Slope - Analysis of topographic properties
Landsat TM images	Seoul : 1996. 4, 1999. 4 Daegu : 1995. 6, 1999. 5 Busan : 1995. 6, 1999. 5	- Extraction of land-cover, NDVI, surface temperature properties

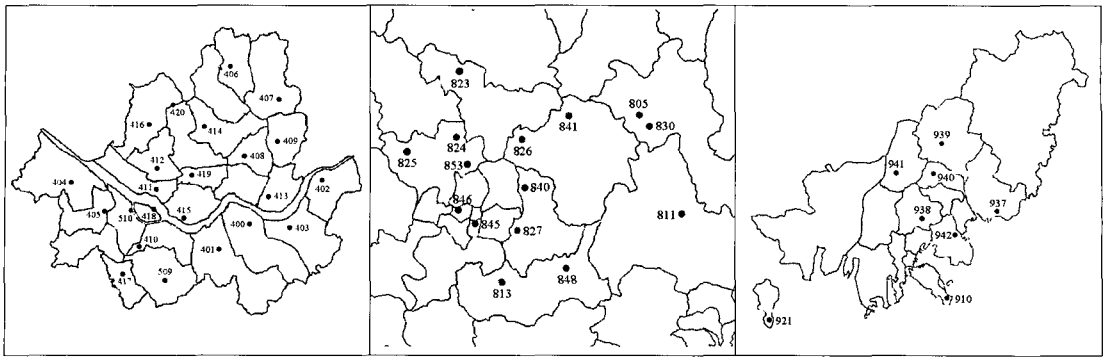

Fig. 1. Location maps of the Automatic Weather Station in Seoul, Daegu and Busan.

지점의 AWS 관측 자료도 함께 사용하였다.

연구는 크게 영상자료 처리와 GIS 자료처리 및 공간분석으로 나누어져 수행되었으며 그 수행 절차는 Fig. 2와 같다. 우선 1:5,000, 1:25,000 수치지도에서 GCP(Ground Control Point)를 추출하여 ERDAS Imagine 8.5를 이용하여 Landsat TM 영상을 기하보정(Geometric Correction)하였다. 이때 발생한 RMS(Root Mean Square) 오차는 0.4 화소 미만이며, 화소의 크기는 30m×30m로 재배열(Resampling) 되었다. 또한 대기의 영향을 고려하여 각 지역별 99년 영상자료를 reference로 하여 각 밴드별 보정량을 결정하여 차감해 주는 한편 95(대구, 부산), 96(서울)년 영상의 각 밴드와 Histogram Matching을 통하여 각 지역별로 서로 다른 두 시기의 영상자료를 정규화(Image Normalization)시켰다(Jensen, 1996). 이와 같은 전처리과정을 거친 후 최대우도분류법(Maximum Likelihood Classification)에 의하여 토지피복분류를 수행하고 식생활력도(NDVI)를 분석하였으며, Band 6을 이용한 지표온도를 추정하였다. 토지피복분류 결과의 정확도는 1:5,000, 1:25,000 수치지도 및 각 지역별 통계자료에 의해 평가되어졌다. 한편 Landsat TM 영상의 촬영시간대와 일치하는 AWS 현지 기온자료만을 추출한 후 기상청이 발행한 자동기상관측지점 일람표와 1:5,000 수치지도를 이용하여 AWS 지점의 정확한 위치 정보를 파악하였다.

또한 Workstation Arc/Info를 이용하여 1:5,000, 1:25,000 수치지도에서 등고선 및 표고점을 추출하여 Coverage 및 Point 형태로 변환한 후 TIN(Triangulated Irregular Network)을 형성하여 본 연구에 사용된 위성영상의 공간해상력과 동일한 Cell 간격 30m의 Grid 데이터를 획득하였다. 이를 기반으로 사면경사(Slope) 및 사면방향(Aspect)을 산출하여 원격탐사 자료로부터 추출된 지표온도, NDVI 및 토지피복분류 결과와 함께 종합적인 GIS 공간분석을 실시하였다.

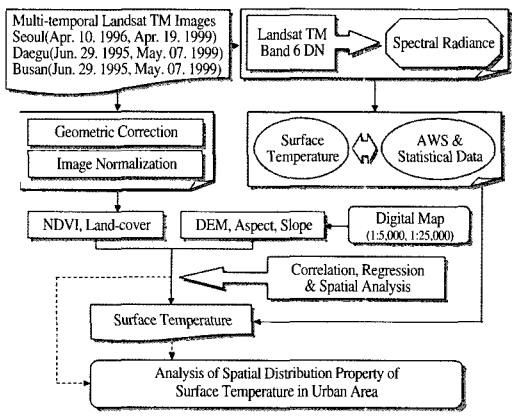

Fig. 2. Block diagram of the data processing step.

3. Landsat TM 영상을 활용한 지표온도 추출

대부분의 지표물체 온도는 거의 300°K이고 8-

14μm 파장대역에 분포하며 최대복사는 9.7μm에서 일어난다. 그러나 이 영역은 대기의 창 내에 존재하고 열적외선 파장대역이어서 육안으로는 식별이 불가능하다. 따라서 이를 감지할 수 있는 열복사계나 열주사계를 사용해야만 한다(Lillesnd, 1987). 실제로 원격탐사자료에 의하여 측정된 온도는 온도계를 대상물에 접촉시켜 측정한 것과는 다른 방사온도(T_{rad})이다. 다시 말하여 절대온도 0°K 이상의 물체는 그 온도에 상응하는 전자파에너지를 외부로 방출시키는데 원격탐사에서는 이를 감지하여 해당 대상물의 운동온도(T_{kin})를 추정하는 것으로 실제 관측온도와는 차이가 있다. 원격탐사 자료로부터 대상물의 정확한 온도를 측정하기란 어려우며 보통 연구대상지역의 온도차 또는 온도분포를 평가하는데 많이 이용되고 있다. 한편 실제 인공위성에 의하여 측정된 자료는 불완전한 복사전달모델 및 대기의 수직적 압력-습도 분포, 표면에서의 복사와 반사 무시 등과 같은 요인에 의한 추정오차에도 불구하고 현장자료와 대비시켜 얻어진 실험식이나 이론적 모델에 적용하여 보다 향상된 표면온도를 추정할 수 있다(양 외, 1995).

본 연구에서는 Markham *et al.*(1986)이 제시한 모델을 이용하여 Landsat TM band 6으로부터 지표온도를 추정하였다. 이 보고서에 의하면 Landsat TM 영상을 이용할 경우 영상의 수치적인 값을 radiance와 같은 Scientific units로 바꿀 수 있는 식이나 상수가 요구되는데, 각 DN에 대해 방사적 그리고 기하학적으로 검정한 검정값을 *QCAL*이라는 기호로서 나타내어 이용하였으며 이와 같은 사후 검정값인 *QCAL*값은 복사휘도로 전환하기 위한 특수 값으로서 6, 7, 8bit의 *DN*을 가진다. TM의 방사적인 검정은 위성으로부터 전송되는 원영상(Raw data)을 재배열함으로써 이루어지는데 이러한 검정된 수치영상 자료는 특정 기간 동안 지상에서 처리되는 모든 영상에 대하여 동일한 사후검정범위를 갖게 되며 이와 같은 정보는 영상자료의 헤드부분에서 찾아볼 수 있다(Landsat TM data format, 1996). 밴드들 사이의 상대적인 검정은 히스토그램 평활화 과정을 통하여 이루어지며, 수치영상의 *QCAL*값으로부터 복사휘도 L_λ(W/(m^2 · sr · μm))로의 변환은 검출기의 최대($LMAX_\lambda$), 최소($LMIN_\lambda$) 복사휘도가 주어질 경우 다음과 같이 계산되어진다.

$$L_\lambda = \frac{(LMAX_\lambda - LMIN_\lambda)}{QCALMAX} QCAL + LMIN_\lambda \text{ or}$$

$$L_\lambda = \text{gain} \times QCAL + offset$$

where, *gain* = Rescaled gain(the data contained in the product header or ancillary data record)
offset = Rescaled gain(the data contained in the product header or ancillary data record)
QCAL = Calibrated and quantized scaled radiance in units of DN
$LMIN_\lambda$ = Spectral radiance at *QCAL*= 0
$LMAX_\lambda$ = Spectral radiance at *QCAL*=*QCALMAX*
QCALMAX = Range of rescaled radiance in DN

한편 위에서 구해진 L_λ를 기초로 지구와 대기 사이의 방사가 일정하다는 가정 하에 위성의 검정상수를 이용하여 다음의 식으로부터 지표온도를 추출할 수 있다(Markham *et al.*, 1986; Chander *et al.*, 2003).

$$T = \frac{K_2}{\ln(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1)}$$

where, T = Effective at-satellite temperature in Kelvin
L_λ = Spectral radiance in W/(m2 · sr · μm)
K_2 = Calibration constant 2 in Kelvin
K_1 = Calibration constant 1 in W/(m2 · sr · μm)

이와 같이 Landsat TM band 6으로부터 추출된 연구대상 지역의 지표온도 영상을 지형특성과 함께 GIS 공간분석을 실시하기 위하여 원영상이 가지는 고유한 값의 변화 없이 Cell을 30m 간격으로 분할하여 Grid 자료로 변환하였다.

서울지역 Landsat TM 영상은 4월 영상으로써 대구, 부산지역 보다 시기적으로 1-2개월 정도 일찍 촬영됨으로 인하여 이들 지역보다 전반적으로 낮은 지표온도 분포대를 나타냈다. 한편 같은 서울지역이라도 Fig. 3에서와 같이 두시기 평균 지표온도 값의 차이가 큼에 따라서 대구, 부산과는 서로 다른 범례를 적용하였다. 1996년 영상에서 평균 지표온도는 약 14.2℃, 1999년 영상에서는 약

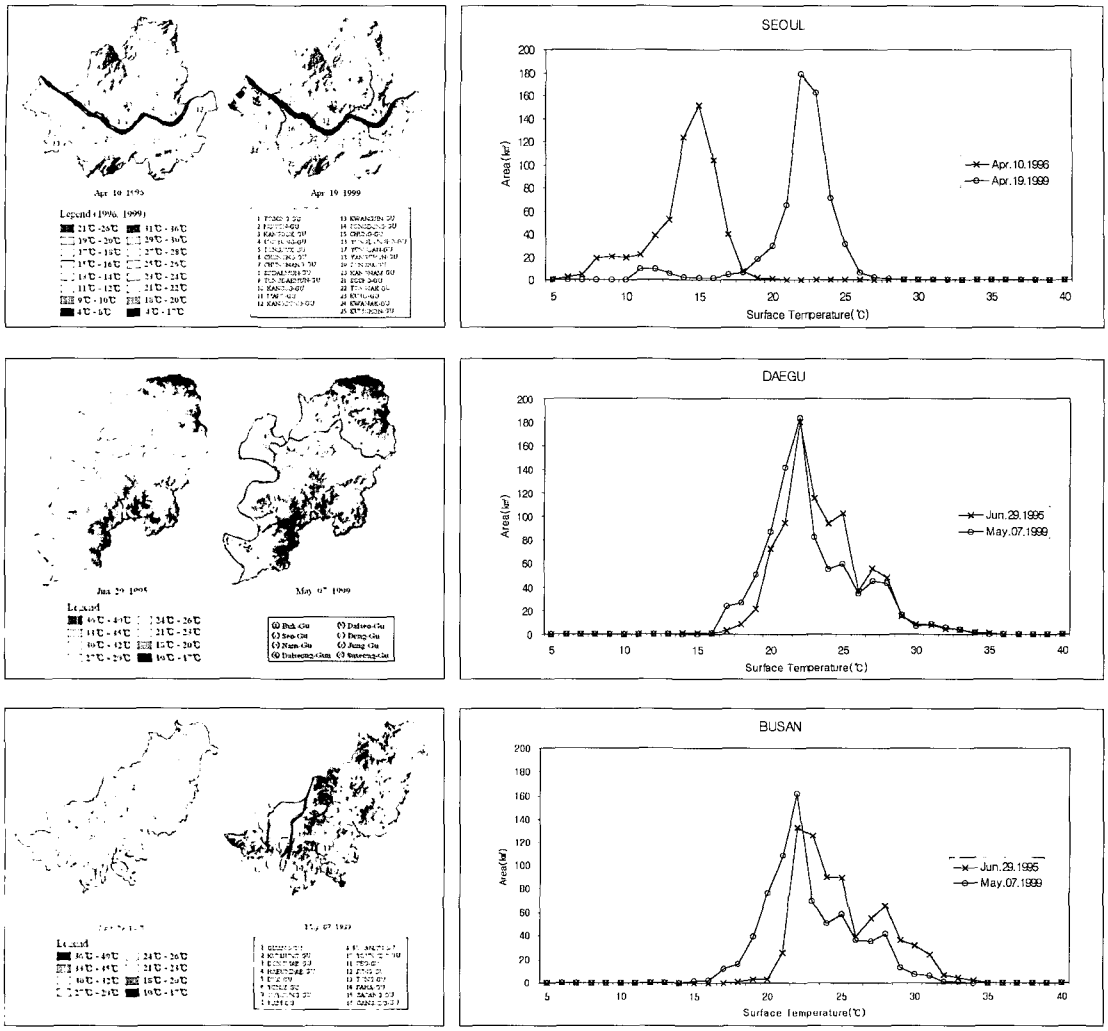

Fig. 3. Surface temperature distribution maps in Seoul, Daegu and Busan.

22.0℃로 확인되었다. 한편 이러한 현상은 동시기의 서울지역 13개 지점의 AWS 기온자료에서도 확인할 수 있었는데 1999년 4월 19일 기온자료가 1996년 4월 10일 자료보다 평균 9℃정도 높은 것으로 나타났다.

각 구별 지표온도 분포대를 살펴보면 동대문구, 중구, 구로구 등이 전체적으로 높은 온도 분포대를 형성하고 있는 것으로 나타났으며 각 지점별로는 강서구의 김포공항주변, 금천구, 구로구의 공업단지, 영등포구, 용산구 및 성동구의 상업지역 밀집 지역들이 가장 높은 지표온도대를 형성하고 있었다. 한편 Landsat TM band 6으로부터 추출된 지표온도의 검증을 위하여 서울지역 23지점의 AWS 관측자료 중에서 사용 가능한 13개 지점의 자료를 추출된 지표온도 자료와 비교한 결과 약 ±0.1-2.0℃ 정도 차이가 있는 것으로 확인되었다.

대구시 각 구별 지표온도를 Fig. 3을 기초로 분석한 결과 중구, 서구, 달서구 순으로 높은 지표온도 분포대가 형성되어 있음을 확인하였으며, 상대적으로 토지피복이 대부분 산림으로 이루어진 동구와 달성군이 가장 낮은 온도대를 형성하고 있는 것으로 나타났다. 한편 가장 협소한 면적을 가지는 중구의 경우 대구의 CBD(Central Business District)지역으로 대부분 쇼핑센터와 중심업무 및

상업시설들로 이루어진 지역으로써 1995년, 1999년 두시기 모두 28℃ 이상으로 가장 높은 지표온도를 보여주고 있다. 또한 북구, 서구, 달서구지역은 금호강 유역에 분포하고 있는 대부분의 공업단지들이 밀집해 있는 지역들로써 이들 지역 중에서도 금단공업단지, 제 3공단, 이현공단, 성서공단 지역들이 각 지점별로 가장 높은 지표온도 분포대를 형성하고 있는 것으로 확인되었다. Fig. 3에서 금호강 유역의 공업단지 밀집지역(1, 2, 5)과 대구 중심지역인 중구지역(7)이 다른 지역보다 확연하게 지표온도가 높다는 사실을 보다 명확하게 보여주고 있다. 전체적으로 대구지역 각 구별, 시기별 평균 지표온도 값은 비슷하지만 1995년 6월 29일 영상이 1999년 영상보다 촬영일이 다소 늦은 관계로 세부적인 온도 분포 값을 살펴보면 조금 높게 나타났는데 이는 대구 주변지역 AWS 관측 온도 자료에서도 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 한편 위성으로부터 추출된 지표온도와 대구 남구, 서구를 포함한 주변 10개 지점의 AWS 현지 기온 자료를 비교, 분석한 결과 서울과 비슷한 약 ±0.1-1.7℃ 정도의 차이가 있는 것으로 나타났다.

마지막으로 부산지역에서는 중구, 동구, 동래구, 연제구 등이 높은 지표온도 분포대를 나타냈다. 각 지점별 온도분포대를 살펴보면 사상구, 사하구의 대단위 공업단지 밀집지역들이 평균 30℃ 이상의 가장 높은 지표온도 분포대를 보여주고 있다. 지역별로는 부산지역을 대표하는 중구(1995년 28.3℃, 1999년 25.7℃), 동구(1995년 28.1℃, 1999년 26.9℃)의 중심지역들이 가장 높은 온도분포대를 나타냈다. 한편 추출된 지표온도를 부산지역 8개 지점의 AWS 관측 자료와 비교한 결과 서울, 대구지역보다 높은 온도 차이를 나타냈는데 특히 가덕도의 경우 위성으로부터 추출된 지표온도가 AWS 관측 자료보다 약 3.2℃정도 높은 것으로 나타났다.

이상과 같이 각 지역별 위성자료로부터 추출된 지표온도를 실제 측정된 지표온도 자료가 아닌 AWS 현지관측 기온자료와 직접적으로 비교하기에는 무리가 있으나 개략적인 온도분포 차이를 파악하기 위하여 상호비교, 분석한 결과 약 ±0.1-3.2℃ 정도 차이가 있는 것으로 확인되었다. 그러나 AWS 기온자료와 위성으로부터 추출된 지표온도의 전반적인 패턴은 유사한 것으로 나타남에 따라서 Landsat TM band 6으로부터 추출된 지표온도를 지표의 피복, 식생 및 지형요인과 함께 도시열 환경의 공간적인 분포 특성을 해석하는데 있어 기초 자료로 활용 가능한 것으로 판단된다.

4. 도시 지표온도 및 공간정보 분포 특성 해석

1) 도시 공간정보 추출

도시지역 지표온도 분포 특성을 체계적으로 해석하기 위하여 각 도시별 토지피복, 정규식생지수 및 고도, 사면경사, 사면방향과 같은 다양한 도시 공간정보를 추출하여 분석하였다. 우선 토지피복 분류에 있어 주거지역은 상업지역을 포함하는 주거지역으로써 도시지역에서 공업지역 및 도로를 제외한 상업, 주거지역을 합하여 주거지역으로 분류하였다. 최대 인구밀집도시인 서울의 경우 타 지역에 비해 주거지역이 약 2배정도 넓은 것으로 나타났으며, 이에 반해 농경지 면적은 최소인 것으로 확인되었다. 대구지역은 두시기 동안(1995년-1999년) 약 40km^2 에 해당하는 산림지역이 대부분 주거지역, 도로 및 밭으로 변화된 것을 확인할 수 있었다. 특히 산림지역이 가장 많았던 달성군(95년 :359.97km^2, 99년 :337.19km^2)과 동구(95년:154.93km^2, 99년:142.74km^2)지역의 산림면적이 가장 많이 줄어든 것으로 확인되었으며 이들 지역의 대부분의 산림이 도시지역, 즉 주거·상업지역으로 편입된 것으로 파악되었다(달성군:26.29km^2-43.11km^2, 동구:18.82km^2-27.85km^2). 한편 부산 기장군, 강서구 및 금정구지역이 부산전체 산림면적의 약 68%를 차지하고 있는 것으로 확인되었다(95년:326.66km^2, 99년:304.59km^2). 낙동강 하구 평야지대에 위치하고 있는 강서구는 부산지역 대부분의 논지역(31km^2)을 포함하고 있으며, 두 시기

Table 2. Results of land-cover classification and accuracy assessment(unit: km^2).

Year \ Class		Residential area	Industrial area	Road	Forest	Water	Paddy field	Barley field	Barren land	Total	Khat	Overall Accuracy
Seoul	1996	336.57	2.92	14.25	210.75	25.55	6.55	2.60	8.50	607.69	0.83	88.22
	1999	341.27	3.64	19.26	204.65	26.64	2.84	1.82	7.55	607.69	0.75	82.40
Daegu	1995	160.83	2.10	5.51	656.49	8.91	29.95	13.53	3.84	881.16	0.74	80.18
	1999	183.37	2.58	7.76	616.88	14.15	27.20	22.38	6.84	881.16	0.78	83.40
Busan	1995	173.63	2.18	18.27	478.30	19.41	37.41	2.66	2.49	734.34	0.79	83.72
	1999	187.04	2.76	22.71	454.87	21.53	39.18	4.50	1.74	734.34	0.80	84.11

동안 산림지역이 주거지역으로 많이 개발되었는데 그 면적이 약 11km^2정도인 것으로 파악되었다. 한편 분류정확도를 검정하기 위하여 모집단을 동질적인 몇 개의 층으로 나누고 이러한 각 층으로부터 단순무작위추출을 행하는 층화추출법(Stratified Sampling)을 이용하여 표본자료를 추출한 후 사용자 및 제작자정확도(User's/Producer's Accuracy), 전체정확도(Overall Accuracy) 및 Kappa 계수를 구하였으며 그 결과는 Table 2에 나타나있다. 그러나 본 연구에 사용된 영상자료의 낮은 공간해상도로 인하여 개별 토지피복항목 중에서는 도로의 분류정확도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 시기적인 영향으로 서울지역의 경작지(논, 밭)가 나대지 등과 혼합됨으로써 이에 대한 분류 정확도가 다른 항목에 비해 낮게 나타났다.

또한 본 연구에서는 Landsat TM band 3, band 4를 활용하여 대기의 영향과 토양에 민감하지 않으며 식생의 활력도를 적절히 반영하는 NDVI (Kauth et al., 1976; 전 외, 1997)를 이용하여 연구대상지역의 녹지활력도를 산출하였다. 그 결과 서울지역 1996년, 1999년 영상에서 추출된 평균 NDVI(138, 138)는 4월이라는 시기적 특성으로 인하여 대구, 부산의 5월, 6월 평균 NDVI 보다 낮게 나타났는데 이는 각 지역별 NDVI 분포도를 비교해볼 때에 보다 명확하게 구분되어졌다.

한편 지형고도, 사면경사 및 사면방향 정보를 Grid 자료로 생성하여 3개 도시의 지형적 특성을 분석하였다. 그 결과 서울은 토지피복상 산림지역이 상대적으로 많이 분포하고 있는 강북 및 관악구 등의 평균고도가 100m 이상인 것으로 나타났는데 특히 강북구의 경우 가장 높은 165.98m의 평균고도를 보여주고 있었다. 이와 반대로 서쪽에 자리하고 있는 강서구가 평균 18.46m로 가장 낮은 지대에 위치하고 있는 것으로 확인되었으며 평균 사면경사는 영등포구가 0.25°로 가장 낮은 것으로 나타났다. 한편 대구지역은 산림지역으로 대부분 이루어진 달성군과 동구의 평균고도가 217.27m, 250.79m로 다른 지역에 비해 현저히 높게 나타났다. 또한 고도 700m가 넘는 지역이 서울 0.05km^2, 부산 0.17km^2와 비교할 때에 대단히 넓은 24.80km^2인 것으로 확인되었다. 전체면적의 약 37% 정도가 평균 사면경사 5° 미만인 것으로 나타났으며 사면방향은 서측, 남서 및 북서사면이 상대적으로 다른 사면보다 우세한 것으로 파악되었다. 부산지역에서는 금정구의 평균고도가 가장 높았으며(192.53m) 낙동강 하구 평야지대에 위치하고 있는 강서구의 평균고도가 가장 낮은(32.43m) 것으로 나타났다. 또한 서울 및 대구지역과 마찬가지로 도심지역의 평균 사면경사는 5° 미만인 것으로 확인되었다.

2) 토지피복 형태별 지표온도

GIS Grid 분석을 통하여 도출된 토지피복별 지표온도의 분포 패턴을 Table 3에서 살펴보면 우선 서울지역의 경우 공업지역이 1996년 15.8℃, 1999년 23.5℃로 가장 높은 지표온도 값을 가지며 상업지역을 포함하는 주거지역, 도로지역이 유사한 온도 분포대를 형성하고 있는 것으로 확인되었다. 한편

Table 3. Results show the mean surface temperature which was extracted from individual land-cover class(unit: ℃).

Class	Seoul		Daegu		Busan	
	1996	1999	1995	1999	1995	1999
Residential area	15.0	22.9	27.8	27.3	28.6	26.5
Industrial area	15.8	23.5	31.1	29.8	30.1	26.5
Road	14.1	22.4	28.2	28.1	28.0	24.6
Forest	11.9	21.3	22.5	21.0	23.4	21.3
Water	8.6	12.3	21.7	18.0	22.0	17.9
Paddy field	13.8	19.9	24.5	22.6	24.6	22.2
Barley field	14.6	22.2	24.8	24.0	26.9	23.8
Barren land	14.5	22.2	27.5	26.4	27.6	24.5

공업지역의 경우 평균고도 26m, 경사 1.6°로 주거지역보다는 다소 낮고 평탄한 지역에 위치하고 있었다.

대구지역 또한 공업지역이 다른 토지피복 클래스보다 약 1-2℃정도 높은 것으로 나타났는데 지형적으로 평균 32m 고도대에 위치하고 있으며 다른 토지피복 클래스와 비교할 때에 가장 낮은 경사도를 나타냈다. 그리고 주거지역과 나지지역이 유사한 온도 분포대를 형성하고 있는 것으로 파악되었는데 1995년 주거지역 27.8℃, 나지 27.5℃, 1999년 주거지역 27.3℃, 나지 26.4℃로 나타났다. 부산지역에서도 공업지역이 가장 높은 온도분포값을 가지고 있는 것으로 확인되었다. 낙동강 하구 논 지역의 경우 1995년 24.6℃, 1999년 22.2℃의 온도분포대를 형성하고 있으며 평균적으로 13m의 고도대에 위치하고 있는데 이는 수계지역을 제외하고 가장 낮고 평탄한 지형이다.

본 연구에서 사용된 Landsat TM 영상의 지역별 촬영 일의 불일치 및 영상자료의 낮은 공간해상도 등으로 인하여 토지피복변화에 의한 지표온도의 변화패턴을 보다 세분화하여 분석하지는 못하였지만 도시 열 환경 특성이 그 주변지역의 토지이용현황에 따라서 명확히 달리한다는 사실을 확인할 수 있었다.

3) 지표온도와 NDVI의 상관성 해석

토지피복패턴별 도시지역 지표온도의 분포 특성을 분석한 결과 수계지역을 제외하고는 산림지역이 가장 낮은 지표온도 분포대를 형성하고 있는 것으로 나타나 이를 기초로 지표온도와 NDVI의 상관관계를 분석하였다. 그 결과 서울, 대구, 부산지역 모두 지표온도와 NDVI 사이에는 부(-)의 상관관계가 존재하고 있는 것으로 확인되었다. 이는 녹지피복에 의한 지표온도의 특성을 대변하는 것으로 도심지역의 경우 토지피복이 아스팔트, 콘크리트와 같은 빌딩 및 도로 등으로 이루어져있어 도심지역 온도상승의 원인으로 판단된다.

Table 4. Results of correlation and linear regression analysis between extracted surface temperature and NDVI.

City	Year	Regression equation	R	R^2
Seoul	1996	y=-0.0512x+21.917	-0.79	0.63
	1999	y=-0.0275x+26.340	-0.75	0.57
Daegu	1995	y=-0.0866x+40.973	-0.85	0.72
	1999	y=-0.0616x+35.106	-0.86	0.73
Busan	1995	y=-0.0570x+35.713	-0.82	0.67
	1999	y=-0.0506x+32.604	-0.79	0.63

상관분석은 변수들 간의 관련성 여부 및 관련이 있다면 어느 정도의 관련성이 있는지를 분석하기 위한 것으로 두 변수사이의 인과관계는 설명할 수 없기 때문에 이를 해석하기 위해서 지표온도를 종속변수로 NDVI를 독립변수로 하여 단순회귀분석을 실시한 결과 Table 4에서와 같이 각 지역별, 시기별 회귀모형을 도출할 수 있었는데, 서울지역 1999년 회귀모형이 상대적으로 다른 모형에 비해

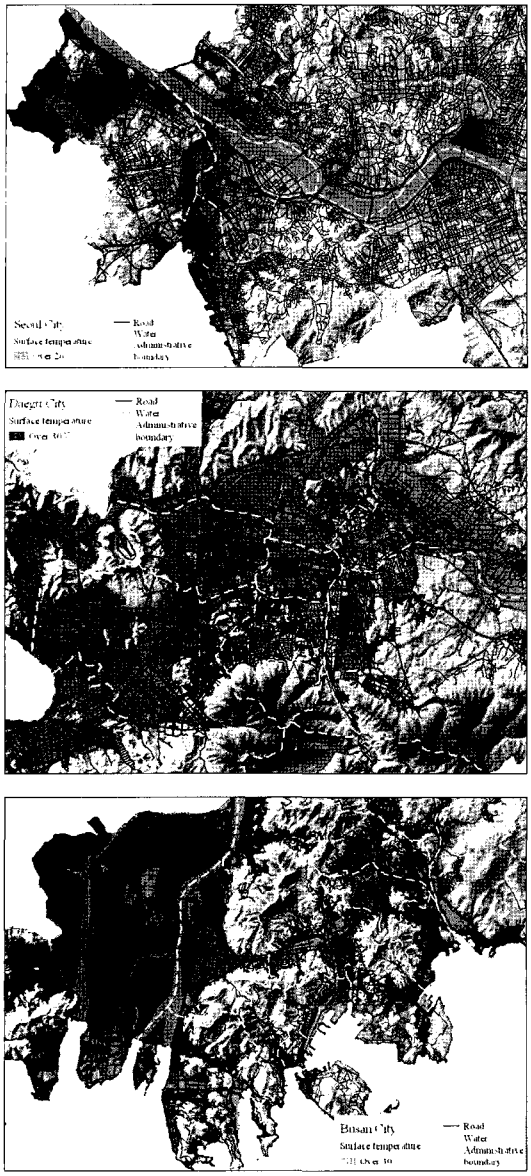

Fig. 4. Results of surface temperature distribution by GIS spatial analysis.

결정계수가 낮게 나타났다. 한편 이들 모형에 대한 적합도 분석은 결정계수(R^2) 및 F 비율값 등으로 설명될 수 있는데 이들 회귀모형에 대한 F 분석을 수행한 결과 F 확률이 0.0001로 나타남으로써 유의수준 5%내에서 이들 회귀모형은 유의하다고 할 수 있다.

한편 NDVI 분포대를 기준으로 지표온도 및 고도, 사면경사, 사면방향을 분석한 결과 평균적으로 121-140 NDVI 분포대에 가장 높은 지표온도가 형성되어 있는 것으로 나타났는데 이는 이들 NDVI 구간이 각 지역별로 가장 광범위하게 분포하고 있음으로 상대적으로 다른 구간보다 전반적으로 높은 온도 값을 많이 포함하고 있기 때문인 것으로 해석되어진다. 또한 이들 구간의 지형적 특성을 분석한 결과 서울지역의 경우 평균 36m, 대구 40m, 부산 30m의 고도 분포대에 포함되어 있으며 사면경사의 경우 서울 2.8°, 대구 1.5°, 부산 3.4°로 나타났다. 한편 토지피복분류상에서 이들 지형적 특성을 포함하는 클래스를 분석한 결과 대부분 주거지역 및 도로지역인 것으로 확인되었다.

4) 도시 지표온도의 공간적 분포 특성 해석

도시 지표온도의 공간적 분포 특성을 GIS 공간분석기법을 활용함으로써 보다 효과적으로 분석할 수 있었다. 우선 서울시의 경우 Fig. 4에서와 같이 대부분 평균고도 30m 미만지역의 낮은 구릉지 지역을 중심으로 높은 지표온도 분포대가 형성되어 있었는데 이들 지역은 1.5°이내의 평탄지로 동남사면을 지향하고 있는 지역들로써 대부분 낮은 녹피율을 나타내고 있는 지역들이다. 한편 도심 외곽의 서울시 행정경계 주변지역을 중심으로 많은 산림지역들이 밀집되어 있는데 이들 지역들이 대부분 저온대를 형성하고 있어 도심과 교외지역 온도분포대를 구분하는 기준선(Baseline) 역할을 하고 있다. 서울시 지표온도를 기준으로 NDVI, 지형고도 및 사면경사를 공간 분석한 결과 1996년 가장 높은 지표온도 클래스는 지형적으로 평균고도 18.64m, 경사 0.37°에 분포하고 있으며, 1999년의 경우 고도 19.41m, 경사 0.64°에 위치하고 있는 것으로 확인되었다. 한편 지표온도가 높을수록 평균 NDVI, 고도, 경사는 점차 낮아지고 있음을 알 수 있었는데 이는 전반적으로 고온대가 도심의 일부 녹지지역을 제외한 평탄한 저지대를 중심으로 형성되어 있기 때문에 나타난 결과로 해석되어 진다.

대구지역은 평균 해발고도 35m미만, 사면경사 1.5°이내로 주로 남동사면을 중심으로 30℃이상의

높은 지표온도대가 형성되어 있는 것으로 확인되었다. 또한 이들 지역의 토지피복현황을 분석한 결과 90% 이상이 상업지역을 포함하는 주거지역과 공업지역으로 형성되어 있는 전형적인 도시지역으로써 일부 도심 공원 녹지지역을 제외하고는 전반적으로 낮은 녹피율을 나타내고 있는 지역들이다. 대구지역은 분지지형으로 인하여 도심의 평균 해발고도는 낮으며 기복이 없는 반면 외곽지역은 산림으로 둘러 쌓여있어 도심과 외곽의 지표온도 차이가 다른 도시에 비해 상당히 명확하게 나타나고 있었다. 대구지역에서 평균적으로 30℃이상의 고온대가 분포하고 있는 지역의 평균고도가 서울 19.4, 부산 22.2m 보다 다소 높은 것으로 나타났다. 한편 23℃미만의 저온대를 형성하고 있는 지표온도 구간은 일부 수계지역을 제외하고는 대부분 산림지역에 분포하고 있는 것으로 나타났는데 이는 이들 지역의 평균 NDVI 및 지형고도, 사면경사로도 확인할 수 있었다.

한편 부산지역의 경우 도심지의 산림지역은 저온대를 형성하고 있는 반면 이들 산림지역을 중심으로 저지대 구릉지에 위치하고 있는 공업단지, 중심업무 및 상업지역들이 전반적으로 30℃ 이상의 높은 지표온도를 나타내고 있었다. 또한 부산항 등 일부 해안선 주변지역에 높은 온도대가 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었는데, 이들 지역 대부분은 저지대에 위치하고 있으며 콘크리트 인공구조물들로 이루어져 있었다. 기타 지표온도의 공간적 분포 특성은 서울, 대구지역과 매우 유사한 것으로 확인되었다.

5. 결 론

본 연구는 최근 도시환경 특성을 고려한 새로운 도시계획 수요가 첨예한 관심사항으로 대두되고 있는 시점에서 위성원격탐사와 GIS와 같은 종합적인 공간정보기술을 활용하여 광역도시를 중심으로 도시 지표온도, 토지피복 및 식생지수 등을 지형인자와 함께 시·공간적으로 분석함으로써 도시 열 환경의 공간적 분포 특성을 보다 체계적으로 해석할 수 있었다.

위성자료로부터 추출된 지표온도와 지상의 AWS 기온자료 사이에는 약 ±0.1℃~3.2℃ 정도의 온도차이가 존재하였으나, 이는 관측방법의 차이로 인한 오차로 간주된다. 그러나 이를 통해 도시 열 환경의 공간적 분포 특성 해석에 있어 위성원격탐사 자료의 적용범위 및 활용 가능성을 규명해볼 수 있었다.

대도시 도심에 위치하고 있는 일부 산림 및 공원녹지 주변지역을 제외하고는 도심의 평균 해발고도는 낮고 기복이 없는데 주로 이들 지역 중에서도 콘크리트와 아스팔트 등과 같은 인공적인 건축재료 및 구조물 등이 밀집되어 있는 지역이 상대적으로 다른 지역 보다 높은 온도 분포대를 형성하고 있었다. 이는 지표온도와 NDVI와의 관계에서도 확인해 볼 수 있었는데, 상대적으로 다른 지역에 비해 녹피율이 낮은 공단지역 및 도심지역의 지표온도가 높게 나타났다. 이러한 결과를 토대로 도시녹지의 기능적 역할에 대한 중요성을 재확인함과 동시에 도시열섬과 같은 도시 열 환경 문제를 개선하기 위한 도시녹지 공간 확충과 같은 도시 기후환경 특성을 고려한 다양한 정책적 입안이 필요할 것으로 판단된다.

한편 이와 같은 다양한 공간정보 및 활용 기술에 대한 지속적인 연구가 수행되어진다면 향후 도시의 기후환경 특성을 고려한 도시계획 수립에 있어 그 기초 자료와 합리적인 적용기법으로 활용되어질 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

김운수, 김학열, 엄정희, 조명희, 오성남, 2001. 기후특성을 고려한 도시계획제도의 도입과 적용 가능성에 관한 연구, 서울시정개발연구원, 2(1): 1-22.

박인환, 장갑수, 김종용, 1999. 추이대를 중심으로 한 경상북도 3개 도시의 열섬평가, 한국환

경평가학회, 8(2): 73-82.

이광재, 2002. 원격탐사자료와 GIS를 이용한 도시 지역의 열 분포 특성 추출기법 개발, 석사 학위논문, 경일대학교.

이용식, 1990. 도시열섬 분석에 있어서 원격탐사 기법의 적용에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교.

이현영, 1989. 원격탐사기법에 의한 도시열섬연구, 지리학 40: 1-13.

양인태, 김만덕, 윤범한, 김연준, 1995. Landsat TM 영상에 의한 난지도 매립지의 발생 열 분포해석, 환경영향평가학회지, 14(2): 59-63.

전성우, 박종화, 1997. 자연환경부문의 원격탐사기법 도입방안에 관한 연구, 한국환경정책·평가연구원.

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.

Chen. P., S. C. Liew, and L. K. Kwoh, 2001. Dependence of urban temperature elevation on land cover types, *The 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore*, 1(2): 1135-1139.

Congalton, R. G., 1988. A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(5): 593-600.

Griend, A. A. and M. Owe, 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces, *International Journal of Remote Sensing*, 14(6): 1119-1131.

Jensen, J. R., 1996. *Introductory Digital Image Processing*, Prentice Hall, New Jersey, USA.

Kauth, R. J. and G. S. Thomas, 1976, The tasseled cap-A graphic description of the spectral-temporal of the agricultural crops as seen by Landsat, *Proc. of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp.41-51.

Lambin, E. F. and D. Ehrlich, 1996. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis, *International Journal of Remote Sensing*, 17(3): 463-487.

Lillesnd, T. M. and R. W. Kiefer, 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*, New York, John Wiley & Sons.

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.

Prakash, A. and R. P. Gupta, 1999. Surface fires in Jharia coalfield, India-their distribution and estimation of area and temperature from TM data, *International Journal of Remote Sensing*, 20(10): 1935-1946.

Remote Sensing Technology Center of Japan, 1996, *Landsat TM Data Format(First Issue)*.

Yuzo Suga, M. Yoshimura, S. Takeuchi, and Y. Oguro, 2000. Verification of surface temperature from Landsat 7/ETM+ data, *The 21st Asian Conference on Remote Sensing*, Taipei, 1(1): 182-187.