수도권 AWS 기온을 이용한 MODIS, Landsat 위성의 지표면 온도 분석

지준범*[†] · 이규태** · 최영진*

*(재)기상기술개발원 차세대도시농림융합기상사업단, **강릉원주대학교 대기환경과학과

Analysis of Land Surface Temperature from MODIS and Landsat Satellites using by AWS Temperature in Capital Area

Joon-Bum Jee*[†], Kyu-Tae Lee** and Young-Jean Choi*

*Weather Information Service Engine, Center for Atmospheric and Earthquake Research

**Dept. of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University

Abstract : In order to analyze the Land Surface Temperature (LST) in metropolitan area including Seoul, Landsat and MODIS land surface temperature, Automatic Weather Station (AWS) temperature, digital elevation model and landuse are used. Analysis method among the Landsat and MODIS LST and AWS temperature is basic statistics using by correlation coefficient, root-mean-square error and linear regression etc.

Statistics of Landsat and MODIS LST are a correlation coefficient of 0.32 and Root Mean Squared Error (RMSE) of 4.61 K, respectively. And statistics of Landsat and MODIS LST and AWS temperature have the correlations of 0.83 and 0.96 and the RMSE of 3.28 K and 2.25 K, respectively. Landsat and MODIS LST have relatively high correlation with AWS temperature, and the slope of the linear regression function have 0.45 (Landsat) and 1.02 (MODIS), respectively. Especially, Landsat 5 has lower correlation about 0.5 or less in entire station, but Landsat 8 have a higher correlation of 0.5 or more despite of lower match point than other satellites. Landsat 7 have highly correlation of more than 0.8 in the center of Seoul.

Correlation between satellite LSTs and AWS temperature with landuse (urban and rural) have 0.8 or higher. Landsat LST have correlation of 0.84 and RMSE of more than 3.1 K, while MODIS LST have correlation of more than 0.96 and RMSE of 2.6 K.

Consequently, the difference between the LSTs by two satellites have due to the difference in the optical observation and detection the radiation generated by the difference in the area resolution.

Key Words : Landsat, MODIS, Land Surface Temperature, AWS temperature, Urban

요약 : 서울을 포함한 수도권 지역의 지표면 온도를 분석하기 위하여 Landsat과 MODIS의 지표면 온도, AWS의 기온, 지표면 고도 및 토지이용도를 이용하였다. Landsat과 MODIS 위성의 지표면 온도와 AWS 기온의

접수일(2014년 3월 3일), 수정일(1차 : 2014년 3월 25일, 2차 : 2월 22일, 3차 : 4월 27일), 게재확정일(2014년 4월 28일).

[†] 교신저자: 지준범(rokmcjib717@gmail.com)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

분석은 상관계수, 평방근 오차(Root Mean Squared Error, RMSE), 선형회귀분석 등의 통계분석방법을 적용하였다.

Landsat과 MODIS 지표면 온도의 상관계수는 0.32이고 RMSE는 4.61 K였다. 그리고 Landsat과 MODIS 지표면 온도와 AWS 기온의 상관성은 각각 0.83과 0.96이며 RMSE는 3.28 K, 2.25 K이었다. Landsat과 MODIS 지표면 온도는 비교적 높은 상관성을 보였으나 각각의 선형회귀의 기울기는 0.45와 1.02이었다. Landsat 5의 경우 전체 관측소에 대하여 0.5이하의 낮은 상관성을 보였고 Landsat 8의 경우는 일치되는 지점이 다른 위성에 비하여 적었으나 0.5이상의 상관성을 나타냈다. Landsat 7은 대부분 0.8이상의 높은 상관성을 보였고 대체적으로 서울중심부에서 높은 상관성이 나타났다. 위성의 지표면 온도와 지표유형에 따른 AWS 기온사이의 상관성은 0.8이상의 높은 상관성을 보였다. Landsat 위성의 지표면 온도의 상관성은 0.84이었고 RMSE는 3.1 K이상이었으며 MODIS 위성의 상관계수는 0.96이상이고 RMSE는 2.6 K이었다.

결과적으로 두 위성의 지표온도의 차이는 관측시간 차이에 의한 것으로 위성의 해상도에 따라 복사량을 탐지하는 지표면의 면적 차이에 의하여 발생하는 것으로 사료된다.

1. 서론

도시지역은 지속적인 성장으로 인한 인구의 집중과 과밀화되고 있다. 평면적인 개발확산을 통한 도시의 확장과 녹지공간의 축소는 도시지역의 온도를 상승시켜 도시열섬을 발생시키고 있다. 따라서 도시의 성장과 더불어 도시기온이 상승해왔다는 사실은 도시열섬 현상의 명백한 증거가 된다(Landsberg, 1981). 또한 도시화 과정에서 나타나는 도시기후의 변화는 기온의 상승으로써 기온은 야외공간 이용 및 만족도에 영향을 미치는 핵심적 물리인자이다(Nikolopoulou and Lykoudis, 2006; Nikolopoulou and Lykoudis, 2007). 도시화에 따른 도시지역의 기온변화는 지상에서 관측된 온도를 통하여 이루어지기도 하나 제한적인 관측 때문에 인공위성 등의 원격탐사를 통하여 연구되어지고 있다. 특히, 인공위성의 열적외 센서는 온도에 민감한 복사적 특성을 가지고 있기 때문에 지표면 온도를 관측하는데 효과적이다.

인공위성 영상을 이용하는 방법은 온도변화를 탐지하고 식생과의 상관관계를 효과적으로 분석하는데 유용한 방안 중 하나로 알려져 있다. 위성자료를 이용하여 대기의 특성을 연구하는 것은 공기온도가 지표면 온도와 관련이 있고 지표면 온도와 공기온도는 양의 상관관계를 가지고 영향을 주고받는 것이다. 과거와 현재의 도시지역 기온과 도시열섬 현상에 대해 짧은 시간에 넓은 지역을 분석할 수 있는 방법으로서 위성의 열적외 데이터를 사용하여 도시의 지표면 온도를 분석하는 것이 중요하다.

국내외적으로 도시지역 온도를 분석하기 위한 다양한 연구가 시도되어왔다. 국내에서는 LANDSAT TM 영상에 의한 호수의 수질인자를 추출하는 연구(Kim *et al.*, 1996, Choi and Yang, 1998)에서 표층수온의 추출이 시도되었으며, 토지피복과 지표면 온도 그리고 식생상태와 지표면 온도의 상관관계를 분석하였다(Jo *et al.*, 2001; Park, 2001; Kim *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2005; Kang, 2006; Lee and Hong, 2008; Jeong, 2009). Na *et al.*(2008)은 Landsat, SPOT, MODIS 위성자료를 이용하여 새만금 지역의 공사전후의 연안환경변화를 감시하여 지표면 온도변화를 비교분석하였다. 그리고 Yoon and Ahn(2009)은 도시열섬 완화 및 열 쾌적성을 고려하기 위한 기초자료로서 지표면 온도의 활용가능성을 제시하였다. 또한, Kim and Yeom(2012)은 경기도 일산의 토지피복유형에 따른 지표면 온도를 MODIS, Landsat 및 Rapideye를 이용하여 분석하였다.

국외의 경우 Prihodko와 Goward(1997)는 NOAA-9 AVHRR 자료로부터 식생지수와 지표면 온도의 상관성을 이용하여 기온을 추정하는 연구를 수행하였다. Suga 등(2003)은 Landsat ETM+ 자료를 이용하여 추정된 지표면 온도의 상관관계를 분석하여 뚜렷한 양의 상관관계에 있음을 연구하였다. Steve *et al.*(2007)은 토지이용이 도시기온에 영향을 미치고 토지이용 계획을 통해 열환경을 향상시킬 수 있다고 하였다. Mallick 등(2008)은 Landsat 7 ETM+ 영상을 이용하여 지표면 온도와 정규식생지수의 매개변수 사이에는 강한 상관관계가 존재한다고 정의하였다. Karnieli 등(2010)은 태양광에 의한 지

표면 온도와 정규식생지수사이의 상호관계가 있음을 정의하였다. 그리고 Liu and Zhang(2011)은 Landsat과 ASTER 위성자료를 이용하여 홍콩의 도시열섬을 분석하였다. Walawender *et al.*(2013)은 Landsat 7 ETM+ 자료를 이용하여 폴란드 카라토우의 지표면 온도의 패턴을 분석하였다.

국내외 대부분의 연구에서 지표온도와 토지이용도 사이의 관계성 분석이 수행되었으며 지표면 온도와 식생지수 사이에서 강한 상관관계가 있음을 제시하였고

또한 지표면 온도의 경향을 분석하였다. 그러나 위성에서 산출된 지표면 온도는 지상에서 관측된 지표면 온도 또는 기온과의 관계성의 분석은 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 MODIS와 Landsat 위성의 지표면 온도와 자동기상관측 (Automatic Weather System, AWS)의 기온자료를 이용하여 서울을 포함한 수도권 지역의 지표온도를 분석하였다. 특히, 위성에서 산출된 지표면 온도는 AWS 기온과의 상관성 분석 등 기초 통계값을 분석하였다.

Fig. 1. Digital Elevation Model (DEM; m) and Landuse category. The red dot means urban station, green dot means rural station.

Table 1. Specification of USGS 33 landuse categories. Gray shaded columns are urban category

Category	Specification	Category	Specification
1	Urban and Built-Up Land	18	Wooded Wetland
2	Dryland Cropland and Pasture	19	Barren or Sparsely Vegetated
3	Irrigated Cropland and Pasture	20	Herbaceous Tundra
4	Mixed Dryland/Irrigated Cropland and Pasture	21	Wooded Tundra
5	Cropland/Grassland Mosaic	22	Mixed Tundra
6	Cropland/Woodland Mosaic	23	Bare Ground Tundra
7	Grassland	24	Snow or Ice
8	Shrubland	25	Playa
9	Mixed Shrubland/Grassland	26	Lava
10	Savanna	27	White Sand
11	Deciduous Broadleaf Forest	28	Unassigned
12	Deciduous Needleleaf Forest	29	Unassigned
13	Evergreen Broadleaf Forest	30	Unassigned
14	Evergreen Needleleaf Forest	31	Low Intensity Residential
15	Mixed Forest	32	High Intensity Residential
16	Water Bodies	33	Industrial or Commercial
17	Herbaceous Wetland		

2. 자료 및 방법

1) 자료

서울을 포함한 수도권의 지표면 온도를 분석하기 위한 연구대상지는 Fig. 1과 같이 서울을 포함한 수도권 일부지역(경도 126.5°E부터 127.5°E까지 위도는 37.2°N부터 37.8°N까지)이며 지표고도와 토지이용도는 국립지리원(www.ngi.go.kr)의 1:5000 수치지도를 이용하였다. 국립지리원 중분류 토지이용도는 USGS 토지이용도 33 분류로 재분류하였다. 그리고 그림에서 붉은색과 녹색의 점은 기상청 AWS관측소의 위치이며 붉은색 점은 도시지역(Table 1의 1과 31-33; 25소)이며 녹색 점은 도시이외의 지역(Table 1의 2-30; 12소)이다. 서울시는 1960년대 이후 지속적인 성장위주의 경제개발정책으로 인해 인구집중과 도시화가 가속화되어 자연생태계 훼손, 도시열섬현상 발생 등 심각한 환경문제를 야기하고 있다. 또한, 지역에 따라 개발정도의 차이가 있으며 토지이용 형태가 상이하여 녹지의 규모 및 분포양상이 다양하다.

기상청에서 관측하는 자동기상관측(AWS) 자료는 서울을 포함한 연구지역에 37소의 관측소에서 관측된 1시간 간격의 기온자료를 사용하였다(Fig. 1, Table 2). AWS 관측소는 도시의 특성에 따라 Fig. 1(b)의 토지이용도를

이용하여 주변 25지점의 토지이용도 중 최빈 토지이용도를 계산하여 관측소의 토지이용도로 선택하였다. 수도권 1998년 이후의 AWS 자료는 백업상에서 관측한 기온자료와 비교한 결과, 월별 기온의 시계열간 상관관계 수 값이 0.98이상으로 높게 나타났기 때문에 AWS의 자료를 이용하였다(Boo *et al.*, 1999). 그리고 지표면의 방출 특성을 고려하여 지표온도로 추정하는 방법을 적용하였을 때 위성에서 산출된 지표면 온도는 AWS 기온사이에는 밀접한 관계성이 있다(Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2007; 박민호, 2001).

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS)는 미국 National Aeronautics and Space Administration (NASA) Earth Observing System(EOS) 프로그램에 의해 Terra와 Aqua 위성에 탑재된 센서(ladsweb.nascom.nasa.gov)로서 Terra는 1999년 12월 18일에, Aqua는 2002년 5월 2일에 각각 발사되어 약 705 km 고도에서 관측이 이루어지고 있다. MODIS는 대기, 지표, 해양 등 지구를 관측하는 센서로 지표면의 온도를 포함한 지표특성을 관측하고 지표면 관측을 통하여 검증되고 있다(Wan, 2008; Wan and Li, 2008). MODIS 자료는 Landsat 자료가 있는 날의 지표면 온도 레벨 2 자료를 수집하여 이용하였으며 사용된 위성자료의 수는 Table 3과 같다.

Table 2. Specifications of AWS stations in study area

Station Number	Location		Altitude	Remarks
108	37.571	126.966	85.800	Urban
116	37.445	126.964	622.370	Rural
400	37.513	127.047	59.580	Urban
401	37.489	127.016	35.530	Urban
402	37.556	127.145	56.900	Urban
403	37.512	127.097	53.620	Urban
404	37.550	126.843	79.100	Rural
405	37.530	126.878	9.730	Urban
406	37.666	127.029	55.500	Urban
407	37.621	127.097	52.050	Urban
408	37.585	127.060	49.380	Urban
409	37.585	127.087	40.210	Urban
410	37.494	126.918	33.800	Urban
411	37.552	126.903	25.490	Urban
412	37.570	126.941	100.630	Rural
413	37.542	127.081	52.540	Urban
414	37.612	126.999	125.900	Urban
415	37.520	126.976	32.620	Urban
416	37.611	126.934	67.580	Urban
417	37.466	126.900	41.480	Urban
418	37.525	126.939	10.660	Rural
419	37.552	126.987	266.440	Rural
420	37.626	126.960	454.940	Rural
421	37.547	127.039	33.710	Urban
423	37.494	126.827	53.470	Urban
424	37.640	127.026	55.680	Urban
509	37.453	126.950	145.130	Rural
510	37.527	126.907	24.410	Urban
532	37.735	127.075	72.000	Urban
540	37.634	126.892	100.000	Rural
541	37.653	127.149	28.000	Urban
546	37.435	127.259	119.370	Urban
569	37.582	127.157	24.000	Rural
572	37.421	127.125	28.720	Rural
589	37.702	126.790	58.000	Urban
590	37.440	127.002	44.350	Rural
649	37.472	126.751	31.000	Rural

Landsat 위성은 1972년 7월 23일 Landsat 1을 시작으로 2013년 2월 13일 Landsat 8이 발사되어 운영 중에 있으며 Landsat으로부터 산출된 자료는 지표면 온도를 포함한 지표특성, 바다, 산림 등의 연구에서 이용되고 있다(Nasa Landsat Project Science Office, 2004). 지표온도를 산출하

Table 3. The information of MODIS data

Satellite	FOV time (UTC)	Resolution (km×km)	Number of Data
TERRA	2:00	1 × 1	118
AQUA	5:00	1 × 1	102

Table 4. The information of Landsat data

Satellite	FOV time (UTC)	Resolution (m×m)	Number of Data
Landsat 5	2:00	30 × 30	33
Landsat 7	2:05	30 × 30	100
Landsat 8	2:13	60 × 30	2

기 위하여 Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 위성에서 관측되는 파장 중 대기의 창 영역에 해당되는 11 μm 자료를 이용하여 산출되었다. Landsat 위성자료(earthexplorer.usgs.org)는 인천을 중심으로 관측되는 path116/row34 영역의 자료를 사용하였으며 자료에 대한 정보와 사용된 자료의 수는 Table 4와 같다. 또한 Landsat자료는 MODIS 자료의 화소에 공간평균하여 일치시켰다.

연구에 사용되는 자료의 기간은 MODIS와 Landsat의 지표면 온도 그리고 AWS 기온자료가 존재하는 2003년 1월부터 2013년 12월까지의 자료 중 연구영역인 수도권 지역에서 구름이 없는 날의 자료를 이용하였으며 활용된 위성자료의 수는 Table 3~4와 같다. 그리고 연구에서 사용된 위성자료의 특성을 알아보기 위하여 Landsat 자료 중 참고일(2003년 5월 8일, 2006년 10월 15일, 2012년 10월 23일, 2013년 9월 16일)의 Red Green Blue(RGB) 영상을 Fig.2와 같이 나타내었다. RGB 이미지는 위성의 관측밴드(R(0.65 μm), G(0.55 μm), B(0.47 μm))의 특성이 조합되어 나타나기 때문에 육안으로 보는 것과 유사하게 나타난다. 이러한 RGB영상을 통하여 수도권지역의 산림, 도시, 그리고 인공 구조물, 초지, 건물, 도로, 강, 호수 등의 구분이 가능하며(World Meteorological Organization, 2007) 위성에서 산출되는 지표면 온도의 위치와 비교분석할 수 있다. 또한, RGB영상을 이용하여 구름의 유무를 조사하여 구름이 있는 날의 자료는 제외하였다. 그러나 Fig. 2(c)의 Landsat 7위성 영상은 2003년 5월부터 위성의 라인 보정센서의 보정문제로 인하여 불연속이 나타나고 있다. 이러한 원자료의 자료부재는 지표면 온도분석에 대하여 영향을 미치지 않기 때문에 보정하지 않은 원자료를 이용하였다.

Fig. 2. RGB image of Landsat satellite.

2) 연구방법

MODIS의 지표면 온도는 최종 산출된 지표면 온도 레벨 2 자료를 이용하였다. MODIS 자료에서 추출된 지표면 온도의 이미지는 Fig. 3과 같으며 관측일의 기상상태에 따른 구름 또는 에어러솔에 의하여 제외되기 때문에 자료의 수는 적을 수 있다. Landsat 위성자료는 밴드별로 정량화된 복사에너지(Digital Number)로 제공되기 때문에 위성별 밴드특성을 이용하여 복사에너지 또는 반사도로 변환한다. Landsat 5, 7 위성자료는 아래의 변환식을 이용하여 변환한다(Chander *et al.*, 2009; Teillet *et al.*, 2001).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{\max} + L_{\min}}{Q_{\text{calmax}} - Q_{\text{calmin}}} \right) \times (Q_{\text{cal}} - Q_{\text{calmin}}) + L_{\min} \quad (1)$$

여기서, L_{λ} 는 관측된 복사에너지($W/m^2/sr/\mu m$)이고 Q_{calmin} 는 정량화된 최소 복사에너지(DN = 0)이고 Q_{calmax} 는 정량화된 최대 복사에너지(DN = 255(Landsat 5,7), DN = 65535(Landsat 8))이며 Q_{cal} 은 관측 정량화된 복사에너지(DN)이다. 그리고 $L_{\min}$ 는 최소 복사에너지로 $Q_{\text{cal}} = Q_{\text{calmin}}$

일 때 복사에너지($W/m^2/sr/\mu m$)이며 $L_{\max}$ 는 최대 복사에너지로 $Q_{\text{cal}} = 0$ 일 때 복사에너지($W/m^2/sr/\mu m$)이다.

그리고 Landsat 8 위성자료는 자료와 함께 제공되는 선형 회귀식의 상수를 이용하여 계산할 수 있다.

$$L_{\lambda} = A Q_{\text{cal}} + B \quad (2)$$

여기서, A , B 는 선형회귀식의 상수이며 밴드별로 제공된 상수값을 이용한다.

식 (1)과 (2)를 통하여 계산된 복사에너지(L_{λ})를 이용하여 밴드별 반사도, 지표온도 등으로 변환할 수 있다. 복사에너지(L_{λ})와 절대온도(K)사이의 관계성을 이용하여 위성관측 온도를 계산한다(Nasa Landsat Project Science Office, 2004).

$$T(K) = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (3)$$

여기서, $T(K)$ 는 위성관측온도이고 K_1 과 L_{λ} 는 보정계수($W/m^2/sr/\mu m$)이다.

계산된 위성관측온도는 토지이용도에 따른 방출률(ϵ , Jin and Liang, 2006)을 적용하여 지표면 온도(T_s)를 산출

Fig. 3. Land Surface Temperature of Landsat and MODIS.

하였다.

$$T_s = \varepsilon^{-\frac{1}{4}} T(K) \quad (4)$$

지표면 온도는 대기에 의한 영향이 있으나 대기조건이 전체 도시지역 위에서 공간적으로 동일하다고 가정하여 대기보정은 하지 않았다.

Fig. 2에서 언급한 참조일에 대한 Landsat의 지표면 온도와 MODIS의 지표면 온도는 Fig. 3과 같다. Landsat의 지표면 온도의 해상도는 30×30 m 또는 60×60 m이며 MODIS 지표면 온도는 1×1 km로 해상도의 차이가 있기 때문에 그대로 비교하는 것은 힘들며 MODIS 자료의

경우 구름 또는 에어러솔의 영향을 제거하여 제공되기 때문에 자료 수가 적다(Wan, 2008; Wan and Li, 2008). 2006년 10월 15일의 MODIS 자료에서 TERRA의 경우 자료 수는 23개였으며 AQUA의 경우는 자료가 없다. 그러나 지표면 온도의 분포를 통하여 서울과 주변지역 그리고 강과 산림 등의 지역에서 온도분포의 차이는 뚜렷하였다. 서울을 중심으로 도시에서 온도가 높게 나타나고 주변지역의 식생, 강 또는 산림지역에서 온도가 낮게 나타났다.

MODIS와 Landsat의 지표면 온도를 비교하기 위하여 저해상도인 MODIS 격자의 자료를 기준으로 격자점을

중심으로 1×1 km 내에 포함되는 Landsat 자료들을 평균하여 비교하였다. 그리고 위성의 지표면 온도와 AWS 기온을 비교하기 위하여 Fig. 1과 Table 2의 AWS 관측소 위치를 기준으로 시간 및 공간을 일치하였다. AWS 자료의 시간일치는 AQUA와 Landsat 위성은 02:00UTC의 AWS 기온과 일치하였고 TERRA는 05:00UTC에 일치하였다. 그리고 공간일치는 AWS 지점을 기준으로 가장 가까운 화소의 값을 일치시켜 비교하였다. 시공간 일치된 자료는 분류에 따라 선형 회귀분석과 상관계수, 평방근오차(RMSE) 등의 기초 통계값을 분석하였다.

3. 결 과

1) MODIS와 Landsat 지표면 온도

위성에서 관측된 지표면 온도는 Fig. 4와 Fig. 5에 산포도와 박스분석을 수행하였다. MODIS(AQUA)의 MODIS(TERRA)와 Landsat의 시공간 일치된 지표면 온

도의 자료수는 연구기간동안 총 650858개였으며 위성 사이의 상관계수는 0.32이고 RMSE는 4.61 K였다. Landsat의 경우 3가지 위성 Landsat 5, Landsat 7 그리고 Landsat 8의 상관성은 각각 0.23, 0.71 그리고 0.71이었으며 RMSE는 14.75 K, 4.61 K 그리고 1.58 K이었다. Landsat 7과 Landsat 8의 상관성이 높았으며 Landsat 8의 RMSE가 가장 작았다. Landsat 8 위성은 2013년 4월 10일과 9월 16일의 자료가 이용되었으며 9월 16일 자료의 경우 MODIS와의 1:1선과 일치하였다. Landsat 5의 자료는 MODIS의 지표면 온도와 비교하였을 때 과소추정되었으며 산출된 지표면 온도의 일관성이 적었다. 박스분석에 따르면 MODIS의 지표면 온도는 Landsat 8과 일치된 자료를 제외한 대부분의 지표면 온도분포는 정규분포에 가까운 것으로 분석된다. 그러나 Fig. 4와 같이 대체로 Landsat의 지표면 온도가 MODIS의 지표면 온도와 비교하여 과소추정되었으며 Landsat의 지표면 온도는 대체로 낮은 온도에 집중되는 것을 알 수 있다. Landsat의 위성별로 보았을 때도 Landsat 8을 제외한 나머지 위성

Fig. 4. Scatterplot of land surface temperature between MODIS and Landsat.

Fig. 5. Boxplot of land surface temperature of MODIS and Landsat.

서 과소추정되었으며 Landsat 5 위성에서 그 차이가 가장 크게 나타났다. 특히, Landsat 5와 Landsat 7의 기존 산출식(Nasa Landsat Project Science Office, 2004)에 따른 지표면 온도의 과소추정된 원인으로는 위성의 예상수명(5년) 이상의 사용에 따른 위성의 노후(Landsat 5(1984년), Landsat 7(1999년))로 위성센서의 감도가 낮아진 것으로 분석된다(Mishra, *et al.*, 2014; Teillet *et al.*, 2001).

MODIS 지표면 온도는 지표면에서 관측된 지표면 온도를 이용하여 산출된 회귀식을 이용하여 산출되었으며 검증된다(Wan, 2008; Wan and Ji, 2008). 그리고 MODIS 지표면 온도는 관측된 지표면 온도 또는 기온을 이용하여 검증하였을 때 정확도가 높았고(Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2007) 본 연구의 MODIS 지표면 온도는 기존 연구와 동일하게 AWS 기온과 높은 상관성이 나타났다.

2) 위성의 지표면 온도와 AWS 기온

MODIS와 Landsat에서 산출된 지표면 온도는 AWS

관측소의 기온과 시공간 일치시켰으며 관측소별로 상관계수, RMSE 및 선형회귀 등의 기초 통계값을 계산하였다. Fig. 6은 주요지점에 대한 위성의 지표면 온도와 AWS 기온에 대한 시계열이다. MODIS의 지표면 온도는 AWS 기온과 유사하나 다소 과대추정되었으며 Landsat의 지표면 온도는 전체적으로 과소추정하였다. 특히, 2003년부터 2004년의 Landsat 5의 지표면 온도는 AWS 기온의 패턴과 전혀 일치하지 않았다.

Landsat과 MODIS의 지표면 온도와 AWS 기온의 상관성은 0.83과 0.96이며 RMSE는 3.28 K와 2.25 K로 비교적 높은 상관성을 가졌다. 그러나 각각의 선형회귀식의 기울기는 0.45와 1.02로서 Landsat의 지표면 온도는 비교적 과소추정되었다. Landsat 지표면 온도의 경우 서울을 가로지르는 한강과 서울 남동쪽 외곽지점들에서 상관성이 0.8이하로 낮았고 MODIS 지표면 온도는 전 지점에서 0.95이상의 높은 상관성을 보였고 상관성이 가장 낮은 AWS 관측소는 구리(569)였다.

Landsat 위성별 지표면 온도의 상관관계는 Fig. 7과 같

Fig. 6. Scatterplot of land surface temperature and AWS temperature.

Fig. 7. Correlation map between MODIS and Landsat LST and AWS temperature.

다. Landsat 5의 경우 전체 관측소에서 0.5이하의 낮은 상관성을 보였으며 Landsat 8의 경우는 일치되는 지점수가 다른 위성에 비하여 적었으나 상관계수는 0.5이상으로 나타났다. Landsat 7은 대부분 0.8이상의 높은 상관성을 보였고 대체적으로 서울내부에서 상관관계가 높았다.

MODIS 위성별 지표면 온도의 상관성을 Fig. 8에 나타내었다. TERRA 위성의 상관성이 대체로 AQUA 위성과 비교하여 높았으나 대부분 AWS 관측소에서 0.8 이상의 상관계수가 계산되었다. 그러나 강동(402) 지점의 상관계수가 다른 지점과 비교하여 0.7이하로 상관계수가

Fig. 8. Same as Fig. 7 except for Landsat 5, Landsat 7 and Landsat 8.

Fig. 9. Same as Fig. 7 except for TERRA and AQUA.

Fig. 10. Scatterplot of land surface temperature and AWS temperature.

낮았고 AQUA 위성의 지표면 온도는 서울 내부의 한강을 중심으로 상관계수가 낮았다.

MODIS의 위성별 일치된 관측자료에 대하여 Landsat과 MODIS의 지표면 온도와 AWS 기온사이의 상관성은 Fig. 9와 같다. 두 위성은 0.8이상의 높은 상관성을 보였

으나 Landsat 지표면 온도의 RMSE는 3.2 K이상으로 높았다. 회귀분석의 기울기가 0.5이하로 MODIS와 비교하여 과소추정되었고 오차가 크게 나타났다.

Landsat과 MODIS의 지표면 온도를 Fig. 1과 Table 1의 AWS 관측소 분류를 적용하여 위성별 관계성을 Fig. 10

Fig. 11. Scatterplot of land surface temperature and AWS temperature.

Table 5. The statistics of land surface temperature and AWS temperature

Category	Satellite	Statistics			
		Correlation	RMSE (K)	Slope	Intercept
All	Landsat	0.84	3.24	0.45	150.62
	TERRA	0.97	2.19	1.04	-7.11
	AQUA	0.96	2.37	0.98	11.88
Urban	Landsat	0.84	3.27	0.46	148.36
	TERRA	0.97	2.56	1.06	-11.56
	AQUA	0.97	2.46	0.98	12.53
Rural	Landsat	0.84	3.17	0.44	0.44
	TERRA	0.97	2.05	1.01	4.61
	AQUA	0.96	2.15	0.97	14.83

에 나타내었다. Landsat과 MODIS의 지표면 온도는 AWS 기온과 0.8이상의 상관성을 보였으며 Fig. 3-Fig. 9와 동일하게 MODIS의 지표면 온도가 Landsat의 지표면 온도와 비교하여 AWS 기온과 상관성이 높았다. 그리고 도시에 위치한 AWS지점에서 다소 높은 상관성을 보였으나 시골지역의 AWS지점에서 RMSE가 작았다(Fig. 11). 위성의 지표면 온도와 토지이용도 분류에 따른 AWS 기온과의 통계값은 Table 5에 정리하였다. 위성의 지표면 온도와 AWS 기온사이의 상관성은 0.8이상의 높은 상관성을 나타내었다. 도시에 위치한 AWS지점에서 다소 높은 상관성을 보였으나 시골지역의 AWS지점에서 다소 낮은 RMSE가 나타났다. Landsat 위성의 지표면 온도의 상관성은 0.84이었고 RMSE는 3.1 K 이상이었으며 MODIS 위성의 상관계수는 0.96이상 그리고 RMSE는 2.6 K이하로 Landsat의 지표면 온도가 과소추정되었으며 일관성이 작았다.

4. 결론

MODIS와 Landsat 위성에서 산출된 지표면 온도를 분석하기 위하여 서울을 포함한 수도권 일부지역의 지표면 고도와 토지이용도 그리고 AWS 기온을 이용하였다. 토지이용도와 지표면 고도는 국립지리원의 수치지도를 이용하여 USGS 토지이용도 33분류로 재분류하였고 AWS 기온은 연구기간에 대하여 위성의 지표면 온도와 일치시켜 분석하였으며 분석결과는 다음과 같이 요약된다.

첫째, Landsat과 MODIS의 지표면 온도의 상관계수는 0.32이고 RMSE는 4.61 K였다. Landsat의 경우 Landsat 7과 Landsat 8의 상관관계가 0.71로 높았고 Landsat 8의 RMSE가 1.58 K로 작았으며 Landsat 5의 상관관계가 가장 낮았고 RMSE는 가장 컸다. 대체로 Landsat의 지표면 온도가 과소추정되었으며 위성에 따라 일관성이 작았다. Landsat 5와 Landsat 7의 예상수명이 5년인 것을 고려

할 때 위성의 노후에 따른 위성센서의 감도가 낮아진 것으로 사료된다.

둘째, MODIS와 Landsat의 지표면 온도를 AWS 기온의 시계열과 산포도를 분석하였으며 Landsat과 MODIS의 지표면 온도와 AWS 기온의 상관계수는 각각 0.83과 0.96이며 RMSE는 3.28 K와 2.25 K이었고 선형회귀의 기울기는 0.45와 1.02로서 Landsat의 지표면 온도는 비교적 과소추정되었다.

셋째, Landsat 위성별 지표면 온도의 상관성을 분석하였을 때 Landsat 5의 경우 전체 관측소에 대해서 상관계수가 0.5이하로 낮았다. Landsat 8의 경우는 일치되는 지점이 다른 위성과 비교하여 적었으나 0.5이상의 상관계수가 나타났다. Landsat 7은 대부분 0.8이상의 높은 상관계수로 계산되었으며 대체적으로 서울중심부에서 상관성이 높게 나타났다. 그리고 TERRA 위성의 상관성이 대체로 AQUA 위성과 비교하여 높았으나 대부분 AWS 관측소에서 상관계수는 0.8 이상이였다.

넷째, MODIS 위성과 일치된 위성의 지표면 온도와 지표유형에 따른 AWS 기온사이의 상관성은 0.8이상의 높은 상관관계를 보였다. 도시에 위치한 AWS지점에서 다소 높은 상관성을 보였고 시골지역의 AWS지점에서 상관계수는 낮았으나 다소 작은 RMSE가 나타났다. Landsat 위성에서 지표면 온도의 상관계수는 0.84였고 RMSE는 3.1 K이상이었으며 MODIS 위성의 상관계수는 0.96이상이었으며 RMSE는 2.6 K이하로 Landsat의 지표면 온도가 과소추정되었으며 일관성이 적었다. Landsat 지표면 온도의 정확도가 MODIS 지표면 온도와 비교하여 낮은 원인으로는 구름화소와 에어러솔 화소의 미제거, Landsat 5와 7 위성의 노후화에 따른 센서의 감도 감소, 공간일치 자료 생성과 고해상도 관측에 따른 불확실성 등 다양한 원인에 기인된 것으로 분석된다.

이상의 결과를 정리하면 MODIS의 지표면 온도는 지상관측자료인 AWS 기온과 높은 상관관계를 가졌으며 대체로 유사한 경향을 보였다. Landsat의 지표면 온도는 MODIS의 지표면 온도와 비교하여 과소추정되었으며 일관성이 적었다. 그러나 최근 운영 중인 Landsat 8은 MODIS 지표면 온도와 AWS 기온의 경향과 유사하였다. 그리고 위성에서 산출된 지표면 온도는 시골보다는 도시에 위치한 AWS 기온과 상관성이 높게 나타났다. 이러한 온도의 관계성을 이용하면 도시와 그 주변지역의

온도 분포 또는 열섬 등의 도시화 분석에 활용성이 높을 것으로 사료된다. 위성으로부터 산출된 지표온도는 실제 관측자료를 얻을 수 없는 지역에 대하여 고해상도의 도시열섬이나 지표온도 등의 분석이 가능하다. 그리고 고해상도 위성자료를 적용하여 도시의 고해상도 지표온도와 기온지도 등의 구축에 활용이 가능할 것이며 위성사이의 보정과 지표 관측자료를 이용한 보정 등을 통하여 현실에 맞는 지표온도 산출 등의 연구가 수행되어야 한다.

사 사

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다(153-3100-3133-302-350).

Reference

- National Geological Information Institute: www.ngi.go.kr
- NASA LAADS(Level 1 and Atmosphere Archive and distribution system): ladsweb.nascom.nasa.gov
- Landsat EarthExplorer : earthexplorer.usgs.org
- Boo, K.O., Y.S. Chun, J.Y. Park, H.M. Cho, and W.T. Kwon, 1999. The Horizontal Distribution of Air Temperature in Seoul using Automatic Weather Station data, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 35(3): 335-343 (in Korean with English abstract).
- Chander, G., B.L. Markham, and D.L. Helder, 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment*, 113(5): 893-903.
- Choi, S.P. and I.T. Yang, 1998. Extraction of Land Surface Change Information by Using Landsat TM Images, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, 21(3): 261-267 (in Korean with

- English abstract).
- Jeong, J.C., 2009. Comparison of Land Surface Temperatures Derived from Surface Emissivity with Urban Heat Island Effect, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 18(4): 219-277 (in Korean with English abstract).
- Jin, M. and S. Liang, 2006. An Improved Land Surface Emissivity Parameter for Land Surface Models Using Global Remote Sensing Observations, *Journal of Climate*, 19(12): 2867-2881.
- Jo, M.H., K.J. Lee, and W.S. Kim, 2001. A Study on the Spatial Distribution Characteristic of Urban Surface Temperature using Remotely Sensed Data and GIS, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 4(1): 57-66 (in Korean with English abstract).
- Karnieli, A., 2010. Use of NDVI and Land surface Temperature for Drought Assessment, *Journal of Climate*, 23(3): 618-633.
- Kim, H.O. and J.M. Yeom, 2012. Effect of the Urban Land Cover Types on the Surface Temperature: Case Study of Ilsan New City, *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(2): 203-214 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.I. and J.H. Kwon, 2005. Identifying Urban Spatial Structure through GIS and Remote Sensing Data: The Case of Daegu Metropolitan Area, *The Korean Association of Geographic Information Studies*, 12(4): 44-51 (in Korean with English abstract).
- Kim, T.G., K.E. Kim, K.S. Jo, and K.H. Kim, 1996. Monitoring of Lake Water Quality Using LANDSAT TM Imagery Data, *Journal of The Korean Society for Geo-Spatial Information System*, 4(2): 23-33 (in Korean with English abstract).
- Landsberg, H.E, 1981. *The Urban Climate*, New York, Academic press. 275pp.
- Lee, C.S., K.S. Han, J.M. Yeom, B.G. Song, and Y.S. Kim, 2007. Thermal Spatial Representativity of Meteorological Stations using MODIS Land Surface Temperature, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 10(3): 123-133 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., D.Y. Yang, J.Y. Kim, and G.S. Chung, 2004. Application of Landsat ETM Image to Estimate the Distribution of Soil Types and Erosional Pattern in the Wildfire Area of Gangneung, Gangweon Province, Korea, *Journal Korean Earth Science Society*, 25(8): 764-773 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.K. and W.H. Hong, 2008. A Study on the Urban Heat Environment Pattern Analysis and Alleviation Plan, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 24(9): 253-260 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.H., J.S. Ahn, H.D. Kim, and S.J. Hwang, 2009. Comparison Study on the Estimation Algorithm of Land Surface Temperature for MODIS Data at the Korean Peninsula, *Journal of the Environmental Sciences*, 18(4): 355-367 (in Korean with English abstract).
- Liu, L. and Y. Zhang, 2011. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong, *Remote Sensing*, 3(7): 1535-1552.
- Mallick, J., Y. Kant, and B.D. Bharath, 2008. Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+, *Journal Indian Geophysical Union*, 12(3): 131-140.
- Mishra, N., D.L. Helder, A. Angal, J. Choi, and X. Xiong, 2014. Absolute Calibration of Optical Satellite Sensors Using Libya 4 Pseudo Invariant Calibration Site, *Remote Sens*, 6(2): 1327-1346.
- Nasa Landsat Project Science Office, 2004. *Landsat 7 Science Data Users Handbook*, 184, http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf.
- Na, S.I., J.H. Park, and H.S. Shin, 2008. Change

- Detection of NDVI, Surface Temperature and VTCI in Saemangeum Area using Satellite Imagery, *Korean National Committee on Irrigation and Drainage Journal*, 15(1): 28-38.
- Nikolopoulou, M. and S. Lykoudis, 2007. Use of Outdoor Spaces and Microclimate in a Mediterranean Urban Area, *Building and Environment*, 42(10): 3691-3707.
- Nikolopoulou, M. and S. Lykoudis, 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries, *Building and Environment*, 41(11): 1455-1470.
- Park, M.H., 2001. A Study on the Urban Heat Island Phenomenon Using LANDSAT TM Thermal Infrared Data-In the Case of Seoul-, *Korean Society Civil Engineering*, 21(6-D): 861-874 (in Korean with English abstract).
- Prihodko, L. and S.N. Goward, 1997. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations, *Remote Sensing of Environment*, 60(3): 335-346.
- Steve, K.J., N.H. Wong, H. Emlyn, A. Roni, and Y. Hong, 2007. The influence of land use on the urban heat island in Singapore, *Habitat International*, 31(1): 232-242.
- Suga, Y., H. Ogawa, K. Ohno and K. Yamada, 2003. Detection of Surface Temperature from Landsat-7/ETM+, *Advances in Space Research*, 32(11): 2235-2240.
- Teillet, P.M., J.L. Barker, B.L. Markham, R.R. Irish, G. Fedosejevs, and J.C. Storey, 2001. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets, *Remote Sensing of Environment*, 78(1-2): 39-54.
- Walawender, J.P., M. Szymanowski, M.J. Hajito, and A. Bokwa, 2013. Land Surface Temperature Patterns in the Urban Agglomeration of Krakow (Poland) Derived from Landsat-7/ETM+ Data, *Pure and Applied Geophysics*, doi:10.1007/s00024-013-0685-7.
- Wan, Z.M., 2008. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products, *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 59-74.
- Wan, Z. and Z.L. Li, 2008. Radiance-based validation of the V5 MODIS land-surface temperature product, *International Journal of Remote Sensing*, 29 (17-18): 5373-5395.
- World Meteorological Organization (WMO), 2007. RGB Composite Satellite Imagery Workshop, Final Report. Boulder, Co, 5-7.
- Yoo, B.M., 1999. *Introduction to Geospatial Information*, DongMyung, 511pp (in Korean).
- Yoon, M.H. and D.M. Ahn, 2009. An Application of Satellite Image Analysis to Visualize the Effects of Urban Green Areas on Temperature, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 37(3): 46-53(in Korean with English abstract).