

MODIS 자료를 이용한 한반도 지표면 온도 산출 알고리즘의 비교 연구

이순환 · 안지숙* · 김해동* · 황수진**

부산대학교 BK21 연안환경시스템연구사업단

*계명대학교 환경방제시스템학과

**부산대학교 과학교육학부

(2008년 3월 26일 접수; 2008년 9월 1일 수정; 2009년 1월 29일 채택)

Comparison Study on the Estimation Algorithm of Land Surface Temperature for MODIS Data at the Korean Peninsula

Soon-Hwan Lee, Ji-Suk Ahn*, Hae-Dong Kim* and Soo-Jin Hwang**

BK21 Coastal Environment System School, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Department of Environmental Conservation and Disaster Prevention, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

**Division of Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Manuscript received 26 March, 2008; revised 1 September, 2008; accepted 29 January, 2009)

Abstract

Comparison study on the land surface temperatures, which are calculated from four different algorithms for MODIS data, was carried out and the characteristics of each algorithm on land surface temperature estimation were also analysed in this study. Algorithms, which are well used for various satellite data analysis, in the comparisons are proposed by Price, Becker and Li, Ulivieri et al., and Wan. Verification of estimated land surface temperature from each algorithm is also performed using observation based regression data. The coefficient of determination (R^2) for daytime land surface temperature estimated from Wan's algorithm is higher than that of another algorithms at all seasons and the value of R^2 reach on 0.92 at spring. Although R^2 for Ulivieri's algorithm is slightly lower than that for Wan's algorithm, the variation pattern of land surface temperature for two algorithms are similar. However, the difference of estimated values among four algorithms become small at the region of high land surface temperature.

Key Words : MODIS, Land surface temperature, Satellite data, Estimation algorithm

1. 서 론

최근 들어 환경이 주요한 사회문제로 대두됨에 따라 이와 관련된 관측자료의 확보가 중요하게 되

었다. 관측자료 획득을 위하여 대규모 경제적, 인적 자원의 투입이 필수 불가결하다. 그러나 최근 원격 탐사기술 특히 인공위성을 통한 관측기술은 이러한 대규모 자원의 투입 없이 환경관련 기초자료를 확보하는 하나의 방안이 되고 있다. 지구환경 위성을 이용한 관측은 직접 측정 또는 비행기 등 다른 원격 탐사 등에 비하여 단시간 내에 자료의 확보가 가능하

Corresponding Author : Hae-Dong Kim, Department of Environmental Conservation and Disaster Prevention, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
Phone: +82-53-580-2930
E-mail: khd@kmu.ac.kr

고, 동일한 장소의 정보를 반복하여 획득할 수 있으며, 장기적인 연속 관측이 가능하기 때문에 시공간변화에 따른 자료의 신뢰도가 매우 높다고 할 수 있다.

특히 인간이 생활하는 인구밀집 지역내 열 환경을 평가하기 위한 기초 자료로 인공 위성자료는 매우 유용하게 사용될 수 있다. 도시지역의 대표적인 열적인 환경문제로 도시 열섬문제가 대두되면서 도시와 교외지역간의 지표면 온도와 대기 온도 차이에 관한 연구가 다수 수행되었다^{1~4)}. 그리고 국지적인 지표면 온도정보를 인공위성자료를 통하여 분석하는 연구 역시 활발히 진행되고 있는데, 이⁵⁾는 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. 박 등⁶⁾은 경상북도 3개 도시를 대상으로 녹지지수와 온도와의 상관성을 분석하고 녹지의 활력에 따른 온도와의 회귀 모델을 도출함으로써 각 지역의 열섬분포를 파악하였다. 조 등⁷⁾은 Landsat TM band 6 영상을 이용하여 지표면 온도를 추출하고 이를 서울시 AWS (automatic weather station) 기온자료와 비교하여 회귀식을 도출한 바 있다. 또한 박⁸⁾은 서울시를 대상으로 Landsat TM의 열적외 데이터를 사용하여 도시 지표면 온도를 추정하여 기온역전현상, 도시열섬현상, 등온선 매핑, 열 특성탐지 등 도시 열 환경을 해석한 바 있다. 김 등⁹⁾은 NOAA AVHRR자료를 이용하여 대구광역시의 지표면 온도를 파악하고, 이를 통하여 국지적인 증발산량을 추정하여 지표면 온도와 증발산량과의 관계를 분석하였다.

지표면 온도의 산출은 대기하층의 기온자료 추정에도 중요한 역할을 한다^{10~12)}. 변 등¹³⁾은 위성자료에 의한 일최고온도의 산출에 있어서 지표면 온도의 정확한 산출이 중요하며, 토지 피복별 온도 분포의 산출이 기온 산정의 정확도에 관계한다는 것을 보였다. Ha 등¹⁴⁾은 AVHRR자료를 이용하여 지표면 기온과 식물의 엽면적지수의 계절변동을 살펴보았다. 그러므로 국지적인 열환경의 분석에는 정확도가 높은 지표면 온도자료가 필요하다.

인공위성 관측기술의 발달로 대부분의 위성은 지표면 온도를 관측하는 적외복사 탐지장비를 탑재하고 있으며, 이를 이용하여 지표면 온도를 산출한다.

위성으로부터 관측되는 적외복사는 대기 중의 수증기나 가스 등에 의한 흡수에 의하여 파장 별로 다양하게 나타난다. 이러한 대기 중의 흡수가 지표면 온도의 산출 오차로 나타난다. 일반적으로 적외영역 내 2개의 적외복사 오차를 분석하는 분리대기창방법(Split Window Method)을 바탕으로 지표면 온도를 산출한다. 그러나 이들의 채널간의 결합 알고리즘은 다양하게 나타나지만 이들에 대한 상호 비교에 관한 연구는 많지 않다. 특히 한반도 지역과 같은 다양한 토지이용분포를 가진 지역의 지표면 온도 산출에 있어서 각 채널별 결합 알고리즘의 차이에 관한 정확한 이해가 필요하다.

그러므로 본 연구는 적외 위성 자료에 지표면 온도를 산출하는 다양한 알고리즘을 적용하여 알고리즘간의 차이를 알아보고, 복잡한 토지피복을 가진 한반도지역의 지표면 온도 산출 정확도 향상을 위한 기초자료로 이용하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. MODIS 센서

MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)는 미국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)의 지구관측 위성인 Terra와 Aqua에 각각 탑재되어 있는 주요 관측 센서로 해양과 육상, 대기에 모두 적용이 가능한 다목적 센서이다.

MODIS 센서는 0.4 μm 에서 14.4 μm 에 이르는 파장대역에 있어서 총 36개 분광 밴드에 대한 높은 방사 감도를 가진다. MODIS 센서의 36개 밴드 중 2개 밴드는 직하(nadir)상태에서 250 m 해상도 영상을 만들며, 5개의 밴드는 해상도 500 m, 나머지 29개 밴드는 해상도 1 km이다. 지구관측위성인 Terra 및 Aqua 위성의 궤도는 705 km 로서 ± 55 도의 스캔 패턴을 가지며 결과적으로 약 2,330 km의 관측 폭을 가진 영상을 제공한다(Fig. 1). 그리고 MODIS 위성의 특징에 대한 설명은 Table 1에 상세히 나타내었다.

2.2. 구름제거와 지리보정

본 연구에서는 NASA에서 제공하는 Cloud mask 자료를 이용하여 각 화소의 휘도온도(brightness temperature)를 분석하여 바이너리 값으로 환산한 뒤 구름을 포함한 화소를 제거하는 방법으로 구름을 제거하였다. 얇은 권운, 야간의 하층운, 소규모의 적

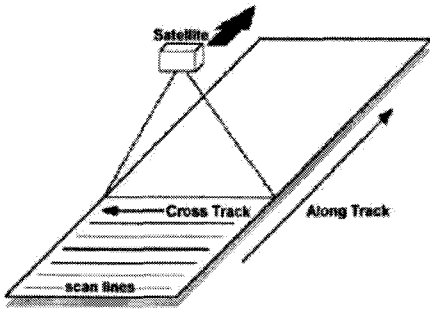


Fig. 1. Schematic of a MODIS observation swath.

운과 같은 형태의 구름들은 단일 채널값을 이용하는 경우에는 배경이 되는 지표와의 구분이 어려운 경우가 많이 발생한다. 또한 화소단위의 면적이 구름 혹은 청천으로 균질하지 않은 경우도 있기 때문에 구름의 가장자리를 구분하는 것은 더욱 어렵다.

한편 MODIS 구름탐지 알고리즘은 몇 종류의 경계값 검사를 통해 구름의 오염여부를 결정한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 하나의 경계값을 이용하여 존재유무를 결정하는 접근법 대신 두 개의 경계값을 이용하여 검사 결과의 신뢰도를 정하는 접근방법을 적용하였다. 즉, 각각의 검사에서 구름이 존재할 가능성에 대한 신뢰도를 결정하고, 전체 검사의 신뢰도를 종합하여 하나의 화소에 구름존재 유무에 대한 신뢰도를 결정하게 하였다.

원격탐사에 의해 획득한 영상자료는 여러 가지 요인들에 의해 영향을 받게 되는데, 이 중에서도 절

대위치에 차이를 나타내는 기하학적 휘어짐이 가장 큰 부분을 차지한다. 이러한 기하학적 왜곡의 원인은 일반적으로 흔히 나타나는 기하학적 오차의 원인으로 위성의 자세, 지구의 곡률, 위성의 진행방향, 좌표투영법의 차이, 관측기기의 오차, 지구자전의 영향 등이 있다¹⁵⁾.

MODIS센서는 한번 스캔을 할 때 2330 km의 관측폭을 가진다. 이러한 넓은 관측폭은 여러 가지 지형왜곡 현상을 유발시킨다. 먼저 위성의 직하 방향을 중심으로 스캔 영역의 가장자리로 갈수록 가장 자리의 화소는 점점 커진다. 이것은 지구 곡률에 의해서 발생한다¹⁶⁾.

본 연구에서는 MODIS의 1 km 해상도의 채널31번과 채널32번을 Geolocation 자료로 이용하여 재배열하였다. 실제 위성 영상을 실제의 이미지에 가장 가깝게 대응하는 화소를 재배열하는 내삼법(neighbor)을 이용하여 지리 보정을 하였다.

3. 지표면 온도 산출 알고리즘

본 연구는 MODIS에 의하여 관측된 디지털 값을 여러 가지 산출 알고리즘을 적용하여 그 차이를 확인하여 보는 것이다. 본 연구에서는 대기의 흡수효과가 상이한 두 파장역(10.8 μm , 12.0 μm)을 이용하여 대기효과를 보정해주는 일반적인 분리대기창 (Generalized Split-Window) 방법을 사용하여 지표면 온도를 산출하였다. 일반적인 분리대기창 방법을

Table 1. MODIS technical specifications

Orbit	705 km, 10:30 a.m. descending node (Terra) or 1:30 p.m. ascending node (Aqua), sun-synchronous, near-polar, circular
Scan rate	20.3 rpm, cross track
Swath dimensions	2,330 km (cross track) by 10 km (along track at nadir)
Telescope	17.78 cm diam. off-axis, afocal (collimated), with intermediate field stop
Size	1.0 m×1.6 m×1.0 m
Weight	228.7 kg
Power	162.5 W (single orbit average)
Data rate	10.6 Mbps (peak daytime); 6.1 Mbps (orbital average)
Quantization	12 bits
Spatial resolution	250 m (bands 1-2), 500 m (bands 3-7), 1000 m (bands 8-36)
Design life	6 years

이용한 지표면 온도 알고리즘은 일차적으로 지표면의 방출율을 알고 지표면 온도가 두 채널의 온도에 선형으로 비례한다는 것을 전제로 한다. 즉 두 채널의 방출율을 알고 있다면 해수면온도 산출에서와 같이 분리대기창 방법으로 대기에 의한 흡수효과를 완화시킬 수 있다.

두 개의 적외선 디지털 값을 각 네가지 알고리즘을 적용하여 지표면 온도를 산출하였다.

먼저 NASA에서 제공하는 알고리즘으로 Wan 등^{17,18)}과 Li 등¹⁹⁾이 제안한 것으로 그 값은 아래와 같다.

$$T_s = (A_1 + A_2 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} + A_3 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon}) \times \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + B_1 + B_2 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} + B_3 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + C \quad (1)$$

MODIS 센서의 실내 실험실 자료와 대기 복사 전달 모형인 LOWTRAN7 (Low resolution transmission model version 7)과 MODTRAN (Moderate resolution Transmission model)을 이용하여 계산된 식으로 2002년과 2003년에 실시된 집중관측자료를 통하여 검증되었다.

두 번째는 Price²⁰⁾가 제시한 NOAA 위성의 산출 알고리즘으로 아래와 같다.

$$T_s = [T_{10.8} - 3.33(T_{31} - T_{32})] \times \left(\frac{5.5 - \epsilon_{31}}{4.5} \right) + 0.75T_{32}(\epsilon_{31} - \epsilon_{32}) \quad (2)$$

이는 NOAA 7 위성의 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)의 두 개 분리대기창 (10.8 μm 와 11.9 μm)을 바탕으로 제시된 것이다. 그리고 해수면 온도 관측을 통하여 식의 타당성이 검증되었다.

세 번째는 Becker와 Li²¹⁾가 제시한 것으로 그 식은 아래와 같이 나타난다.

$$T_s = 1.274 + (1 + 0.15616 \frac{1-\epsilon}{\epsilon} - 0.482 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon^2}) \times \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + (6.26 + 3.98 \frac{1-\epsilon}{\epsilon} + 0.482 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon^2}) \times \frac{T_{31} - T_{32}}{2} \quad (3)$$

위 식은 해수면 온도 계산에 주로 이용되는 분리 대기창 법을 육지면 온도 분석에 이용하기 위하여 복사전달 모형(LOWTRAN 6)을 통한 지표면 온도와 복사의 관계를 제시한 식이다. 위식 역시 NOAA 9의 AVHRR을 통하여 검증되었다.

네 번째는 Ulivieri 등²²⁾이 제시한 것으로 알고리즘은

$$T_s = T_{31} - 1.8(T_{31} - T_{32}) + 48(1-\epsilon) - 75\Delta\epsilon \quad (4)$$

이다. 지표면 온도를 산출함에 있어서 대기의 복사량을 파장별로 고려하여 간단하게 계산된 식으로 역시 NOAA 위성자료를 통하여 검증 하였다.

그리고 식(1)의 $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C$ 는 각각 다양한 대기조건, 지표면 온도 그리고 위성의 천정각 조건을 이용한 회귀식으로 구하는 상수로 센서 제작초기 실험실 관측을 통하여 정해진 값이다. $\epsilon = (\epsilon_{10.8} + \epsilon_{12.0})/2$, $\Delta\epsilon = \epsilon_{10.8} - \epsilon_{12.0}$ 이고, $T_{31}, T_{32}, \epsilon_{31}, \epsilon_{32}$ 는 MODIS 채널 31번과 32번의 휘도온도와 방출률이다. 위의 4가지 지표면 온도 산출 알고리즘을 적용하여 각 산출 알고리즘이 가지는 특징을 분석하였다.

위성자료를 통한 지표면 온도는 계절적 변동이 크기 때문에, 본 연구에서는 계절이 다른 4일을 선정하여 위성자료를 분석하였다. 연구에 사용된 위성 관측일은 Table 2에 나타내었다. MODIS 관측은 1일 2회의 주기로 두 개의 위성(Aqua, Terra)이 한반도를 통과할 때 이루어진다. 본 연구에서는 각 계절별 구름이 적은 4일, 총 8회의 관측자료를 분석하였다.

그리고 한국 기상청이 운용하는 67개의 기상대급 지표면 관측자료를 이용하여 위성 관측 지표면 온도를 검증하였다(Fig. 2). 일반적으로 지표면 온도의 측정은 기상청의 지상관측지점에서 하루 6시간 간격으로 3시, 9시, 15시, 21시에 걸쳐서 4회 실시된다. 이는 위성이 한반도를 지나가는 시간과 다소 차이가 있고, 시간의 대표성에 다소 문제가 있다. 그러나

Table 2. Observation times of MODIS data used in this study

Date	Day/Night	Time (LST)
2005.04.23	Day	11:50
	Night	22:55
2005.08.28	Day	11:05
	Night	22:10
2005.10.24	Day	11:00
	Night	22:05
2005.11.25	Day	11:00
	Night	22:05

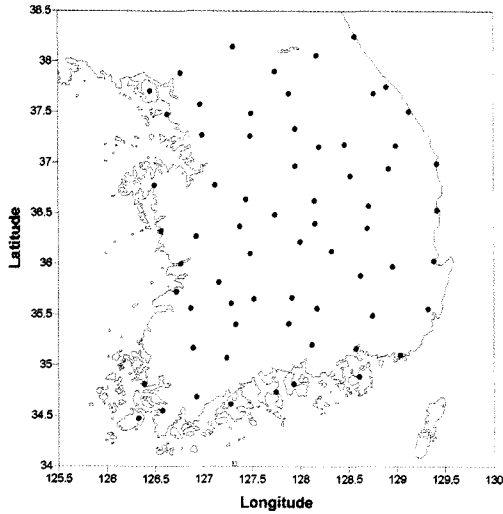


Fig. 2. Location of surface temperature observation sites controlled of Korea Meteorological Administration.

본 연구는 위성자료의 분석 알고리즘에 대한 차이를 정성적으로 비교하는 것이기 때문에 정확한 시간 일치성이 필수적인 것은 아니다²³⁾.

그러므로 위성 분석 결과의 통계적 검증을 위하여 낮의 경우 9시와 15시의 지표면 온도 관측치를 이용한 회귀식을 생성하여 분석 관측값을 생성하였다. 그리고 야간의 경우 21시 관측치를 직접적으로 비교하여 검증을 실시하였다. 즉 낮시간 동안의 실제 관측치에 해당하는 값은 9와 15시의 관측된 지표면 온도와 기온의 회귀식을 이용하여 추정된 지표면 온도를 이용하여 산출된다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 지표면 온도 산출 알고리즘 비교

Fig. 3은 MODIS 센서 지표면 온도 분석 알고리즘

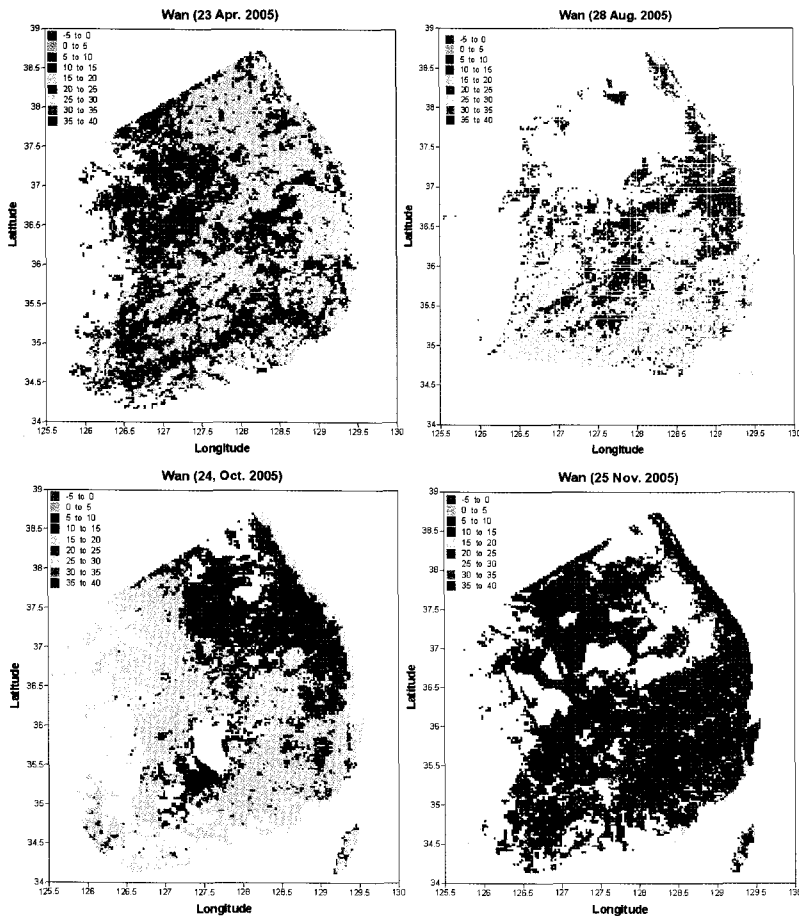


Fig. 3. Distribution of land surface temperature at day-times in 4 different dates. Blanks in the figure indicate the missing data due to cloud.

으로 채용된 Wan의 방법으로 계산된 각 대상일 낮 시간의 지표면 온도를 나타낸 것이다²⁴⁾. 그림에 나타난 온도는 위성이 한반도 상공을 통과한 시간의 지표면 온도를 의미한다. 이들 위성의 정확한 관측 시간은 Table 2와 같다. 전체적인 지표면 온도는 계절별로 뚜렷하게 변하는데 태양 복사 강도가 강한 여름철에 전체적으로 지표면 온도가 높게 나타난다. 여름철 대구, 울산, 부산 등 한반도 남부 대도시에서는 위성 통과시 약 40℃에 가까운 고온역이 나타난다. 이러한 여름철의 분포는 도시지역의 분포와 매우 잘 일치한다. 특히 계절에 관계없이 대구 광역시의 지표면 온도는 주변 지역에 비하여 매우 뚜렷하고 높게 나타난다. 그리고 가을인 10월의 경우, 지형적 영향으로 해발고도가 높은 산악지역과 평야지대의 지표면 온도차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 11월의 경우 남동 해안지방이 서해

안에 비하여 지표면 온도가 높게 나타났다. 이는 해안지역에 위치한 대도시군에 의한 인위적인 요인에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 각각의 계산 알고리즘을 이용하여 작성된 2005년 8월 28일의 한반도 지표면 온도를 나타낸 것이다. Fig. 3의 Wan의 계산 알고리즘에 의한 지표면 온도 분포와 비교하면 Ulivieri의 알고리즘을 제외하고 나머지 계산 알고리즘에서는 전체적으로 높은 지표면 온도의 영역이 다수 나타난다. 특히 Becker와 Li의 계산에서는 도심지 뿐 아니라 내륙에 위치하는 평야지대에도 35℃ 이상의 고온역이 나타난다. 이 알고리즘은 지표면 온도를 다른 알고리즘에 비하여 과대 모의하는 경향이 있다. 반면 Price의 알고리즘은 전체적으로는 낮은 지표면 온도를 산출하는 것으로 나타내지만 다양한 공간 규모의 고온영역도 동시에 나타난다. 이에 비하여 Ulivieri의

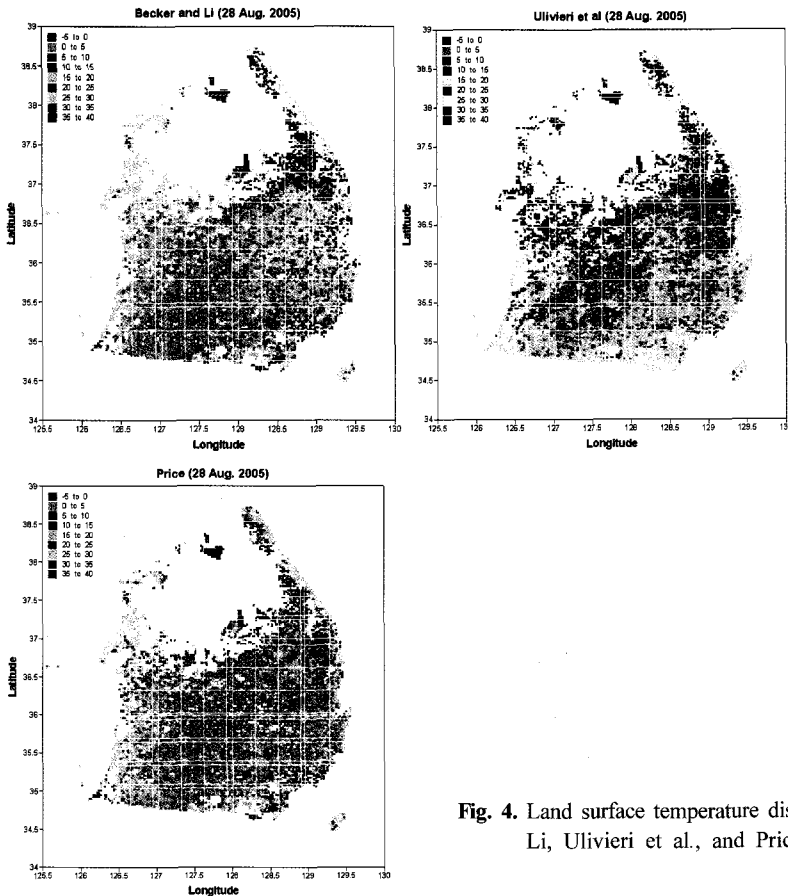


Fig. 4. Land surface temperature distributions estimated by Backer and Li, Ulivieri et al., and Price methods.

알고리즘은 Wan의 알고리즘과 유사한 지표면 온도 분포를 나타낸다. 그리고 전체적으로 도시부의 고온영역과 평야지대의 온도가 동시에 하강하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 각 알고리즘의 특성을 파악하기 위하여 Wan의 알고리즘을 기준으로 작성한 지표면 온도의 산포도를 나타낸 것이다. 산포도는 2005년 8월 28일 자료를 기준으로 작성되었다. 각 알고리즘에 의하여 계산된 지표면 온도가 Wan의 알고리즘에 의해 계산된 지표면 온도와 전체적으로 유사하다. 그러나 Price의 알고리즘을 통한 지표면 온도에서 평균값은 잘 일치하나 과대와 과소평가된 부분이 많아 분산도가 매우 크다. 그리고 Becker와 Li의 알고리즘의 경우 분산도는 크지 않으나 전체 지표면 온도의 평균치가 높게 나타난다. 반면 Fig. 4에서 본 바와 같이 Olivieri의 알고리즘은 앞의 두 알고리즘에 비하여 일치도가 높게 나타난다. 여기서 특징적인 것은 알고리즘에 상관없이 지표면 온도가 높을수록 각 알고리즘의 차이가 작다는 것이다. 즉 지표면 온도 20℃를 기준으로 분산의 정도가 차이가 난다. 그러므로 지표면 온도가 높은 구간에서는 알고리즘에 따른 분석 지표면 온도의 차이가 줄어드는 경향이 있다.

알고리즘에 의한 계절별 지표면 온도의 정량화된 분포변화를 보기 위하여 각 알고리즘에서 계산된 지표면 온도의 출현 빈도를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 계절에 상관없이 Becker and Li의 알고리즘에서 고온역의 분포가 가장 크게 나타난다. 반면 Price의 알고리즘은 저온의 지표면 온도를 가장 많이 모사한다. 특히 가을과 겨울의 경우 낮은 지표면 온도의 빈도가 매우 높게 나타난다. 이러한 계절적인 변화는 Price의 알고리즘이 다른 모형과 달리 해양상의 관측 자료를 바탕으로 작성되었고, 보정에 사용된 복사 전달 모형의 차이에 의한 것으로 보인다. 그리고 Wan과 Olivieri의 알고리즘을 보면, 약간의 빈도차이는 있지만 최대 빈도의 온도는 매우 유사하게 나타난다. 온도 분포 폭도 다른 두 가지 알고리즘에 비하여 작게 나타난다. 그러므로 다양하게 검증된 알고리즘이라도 사용하는 위성 자료에 따라 특징적인 온도 분포를 가질 수 있음을 알 수 있다. 그럼으로 표현하지는 않았지만 야간

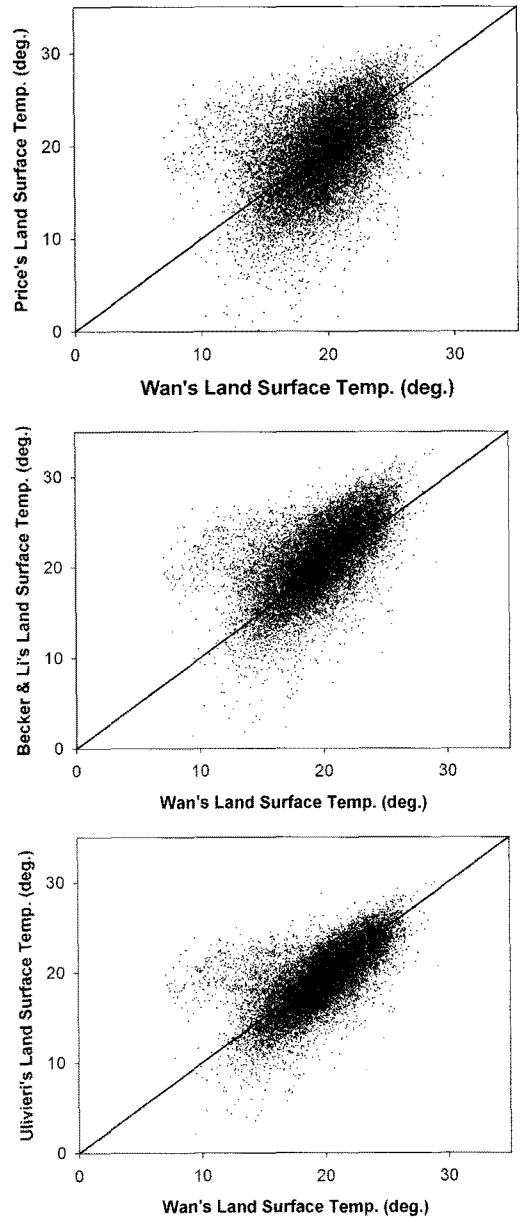


Fig. 5. Scatter plots of land surface temperatures based on the different window split algorithms: a) Price versus Wan, b) Becker & Li versus Wan, and c) Olivieri versus Wan's algorithm.

의 경우도 비슷한 경향성이 나타났다. 그리고 온도 분포의 폭은 낮시간의 분포폭에 비하여 작게 나타나는 경향을 보였다. 위에서 Wan과 Olivieri의 알고리즘은 매우 높은 일치도를 나타낸다. 특히 지표면

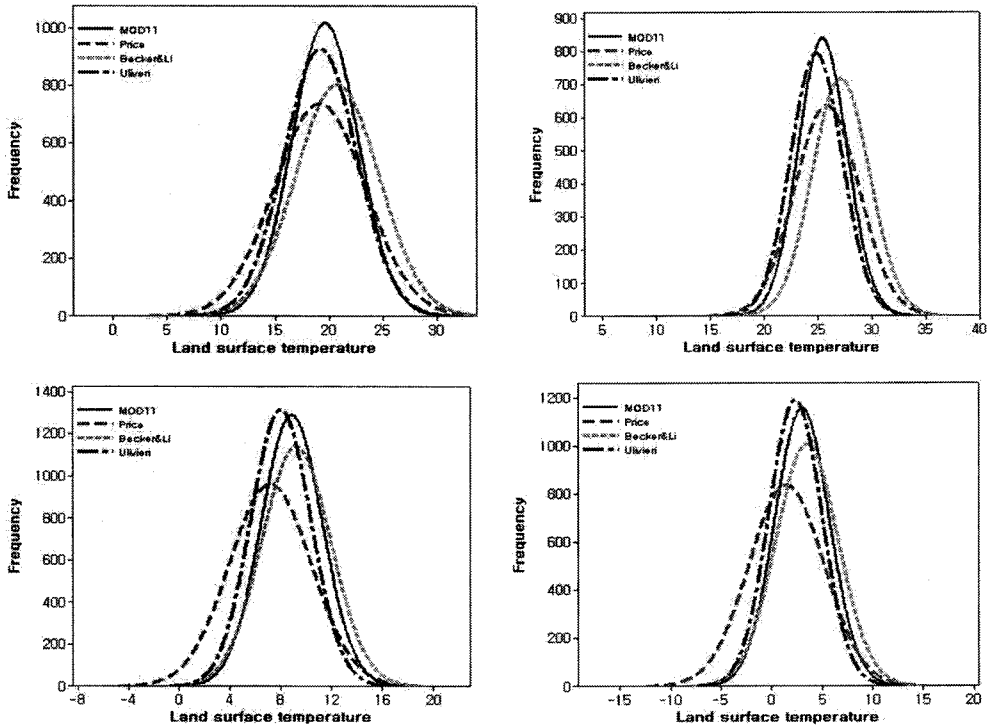


Fig. 6. Occurrence frequency of land surface temperatures for different algorithms at a) 23 April, b) 28 August, c) 24 October, and d) 25 November, 2005.

온도가 높을수록 일치도가 더욱 높아진다(Fig. 5).

낮시간 동안 높은 지표면 온도를 나타내는 한반도 동남지역의 대표적인 대도시인 부산광역시와 대구광역시의 산포도를 통하여 지리적인 위치가 지표면 온도 알고리즘의 분석 결과에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 7은 대구광역시와 부산광역시의 여름과 겨울철의 Wan과 Ulivieri의 알고리즘에 의해 계산된 지표면 온도의 산포도를 나타낸 것이다. 여름철 대구지역의 지표면 온도 산포도는 잘 일치하는데 비하여 부산지역의 지표면 온도 산포도는 분산이 매우 크다. 이는 동일한 대도시 환경이라도 입지조건에 따라 알고리즘의 차이가 나타남을 의미한다.

일반적으로 중규모 순환을 일으키는 요인은 지형, 복사와 지표면 토지이용에 따른 열수지의 불균일, 바람 등에 의한 열의 이동 등 여러 가지가 있다. 특히 한반도의 경우 바다와 육지 사이의 열적인 환경차이에 의하여 발생하는 해륙풍은 대표적인 중규

모 순환이다. 그러나 대구지방의 경우 내륙에 위치하기 때문에 이러한 중규모 순환 강도가 약하게 작용하여 지표면 온도의 수평적인 이동이 작다. 반면 부산의 경우 해안에 위치하기 때문에 해륙풍 등 중규모 기상요란을 일으키는 요인이 많아 알고리즘별 계산 지표면 온도의 차이가 나타난다. 이러한 경향은 겨울철에도 동일하게 나타난다. 즉 중규모 순환에 의한 대기의 이동은 지표면 온도의 산출정확도에 영향을 미친다. 그리고 겨울철의 경우 산포도의 분산은 작으나 일치도는 여름에 비하여 떨어진다. 이것은 Fig. 5에서도 설명한 바와 같이 지표면 온도가 낮으며 알고리즘에 의한 지표면 온도의 차이가 크게 나타나는 것과 관계된다. 그러므로 위성자료에 의한 지표면 온도의 산정은 계절적인 요인과 지리적인 요인이 동시에 고려되어야 정확한 지표면 온도를 산출할 수가 있다. 그러나 계절적 변화에 따른 산출 알고리즘상의 지표면 온도 변동폭이 변화하는 점 등에 관해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로

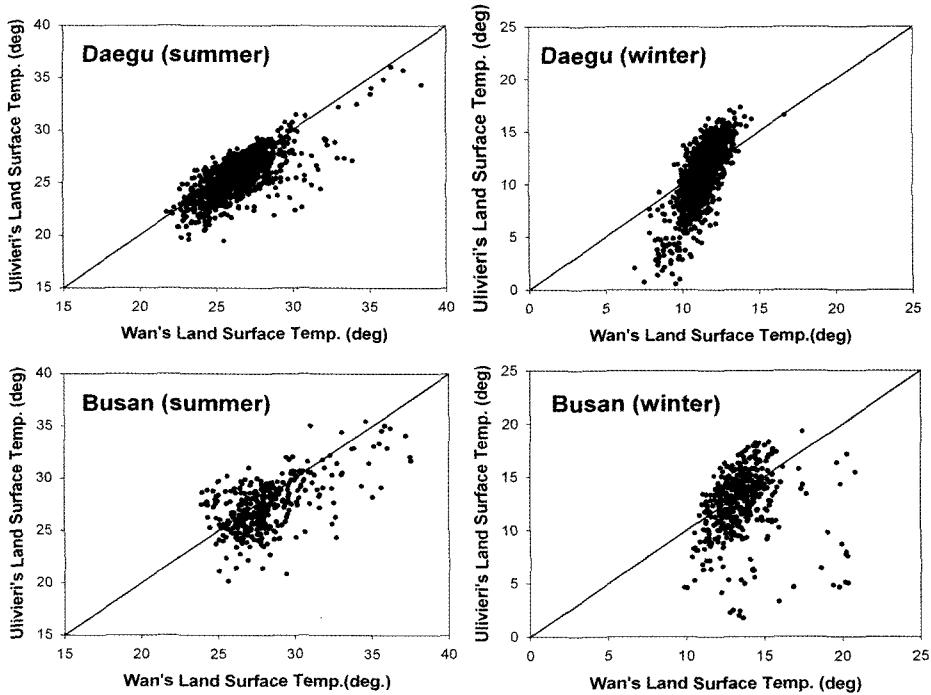


Fig. 7. Scatter plots of Ulivieri and Wan's land surface temperature at Busan and Daegu metropolitans areas.

사료된다.

4.2. 관측 지표면 온도에 의한 검증

앞 절에서 4가지 지표면 산출 알고리즘을 상호 비교하였다. 그러나 그것은 상대적인 자료간의 비교이기 때문에 실제 관측치 비교를 통하여 검증할 필요가 있다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 지표면 온도의 경우 하루에 6시간의 간격으로 4회(3시, 9시, 15시, 21시) 관측이 이루어진다. 특히 지표면 온도의 변동이 심한 주간인 경우 단지 2회 관측만 이루어질 뿐이다. 그러므로 일반적으로 MODIS 관측이 이루어지는 정오 부근에는 지표면 관측이 이루어지지 않기 때문에 직접적으로 위성자료추정에 의한 지표면 온도와 관측에 의한 지표면 온도를 비교할 수 없다. 따라서 위성으로부터 산출된 지표면 온도와 관측된 지표면 온도를 이용하여 검증하기 위해서 우선 위성의 한반도를 지나가는 시간과 동일한 시간의 지표면 온도를 추정하여야 한다. 본 연구에서는 태양 복사에 의해 낮과 밤의 기온과 지표면의 온도가 상승, 하강한다는 가정 하에 기상관

측지점의 지표면 온도와 기온을 이용하여 회귀식을 구하였다.

기상관측 자료를 통한 지표면 온도의 추정은 정확도 측면에서 실제 지표면 온도값과 차이가 나타날 수 있다. 그러나 현실적으로 지표면 온도를 매시간 정규 관측을 통하여 획득하는 것은 불가능하며, 본 연구가 지표면 온도의 정성적인 변화를 통한 위성자료의 특성을 알아보기 위한 것이기 때문에 직접적 관측 자료를 대신하여 통계적 회귀식을 사용하였다.

최종적으로 실제 지면에서 관측된 지표면 온도를 이 회귀식에 적용하여 위성이 한반도를 통과하는 시간과 동일한 시간의 지표면 온도를 추정하였다. 이러한 추정치를 위성 알고리즘에 의해 산출된 지표면 온도와 비교하였다.

Fig. 8은 기온과 지표면 온도의 다중 회귀식을 바탕으로 구한 각 대상일의 지표면 온도를 나타낸 것이다. 지표면 온도의 계절적인 변화가 매우 뚜렷하며 특히 여름철의 도시지역이 매우 뚜렷이 표현되고 있다. 또한 지형고도에 따른 산악지역과 평야지

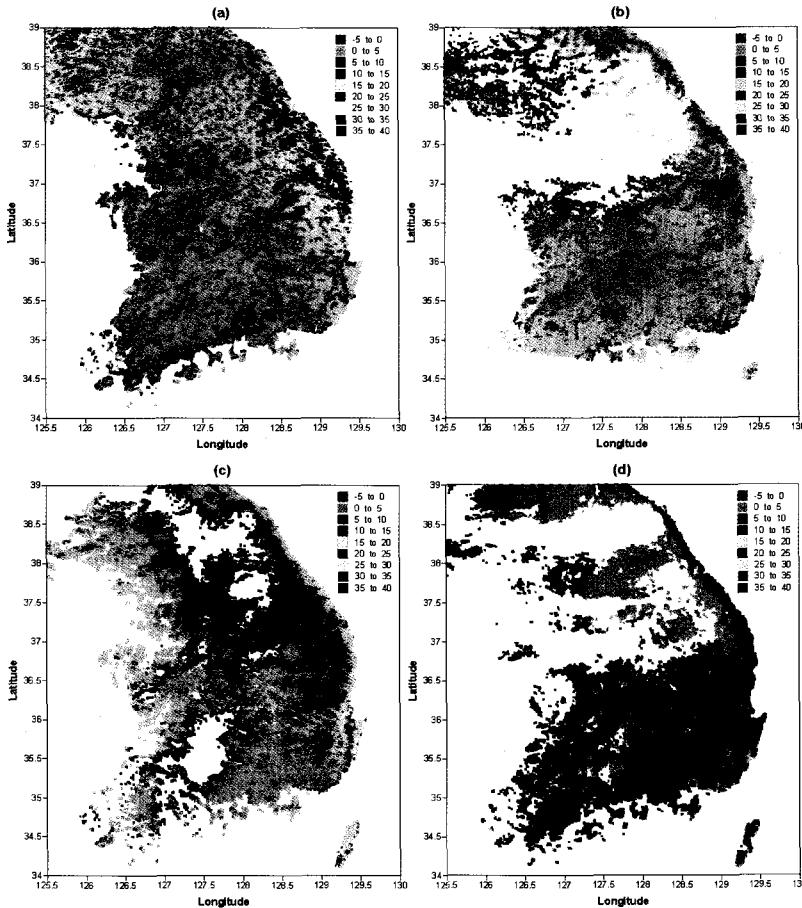


Fig. 8. Distribution of observation based land surface temperature (°C) at a) April 23 b) August 28, c) October 24, and d) November 25, 2005.

역의 온도분포 역시 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 비록 간접적이지만 이 지표면 온도값을 관측치로 하여 각 알고리즘에 의해 계산된 지표면 온도를 검증하였다.

검증은 회귀식에서 생산된 관측치와 위성자료를 각 알고리즘별로 분석한 지표면 온도의 상관 분석을 통하여 실시하였다. 상관분석은 변수들 간의 관련성 여부 및 정도를 분석하기 위한 것으로 두 변수 사이의 관계를 상관계수(coefficient of correlation, R) 및 상관계수의 제곱을 나타내는 결정계수(coefficient of determination, R²)로 나타내었다.

추정된 위성이 한반도를 지나간 시간과 동일한 시간대의 지표면 온도자료와, 앞장에서 산출된 Wan, Price, Becker와 Li 및 Ulivieri 등의 알고리즘을 이용하여 계산한 지표면 온도를 통계 분석하여

Table 3에 나타내었다.

MODIS 위성영상을 이용하여 산출된 지표면 온도와 지상관측자료를 이용하여 추정된 지표면 온도의 상관계수는 0.68에서 0.96까지 나타났다. 전체적으로, 봄에 가장 높은 상관관계를 나타냈으며 결정계수도 봄의 경우 다른 계절에 비하여 높게 나타났다. 주·야간의 경우를 봤을 때 봄, 여름, 가을의 경우에는 주간이 야간에 비하여 높은 상관관계를 나타냈으나, 겨울의 경우에는 야간이 주간보다 높은 상관관계를 나타내었다. 그리고 전 알고리즘의 지표면 온도 상관은 비슷한 경향성을 가지며, 상관계수와 결정계수값은 유의한 수준을 나타낸다.

알고리즘별로 살펴보면, Wan의 경우 관측치와 가장 높은 상관관계를 나타내고 있으며 다음으로 Ulivieri 등의 알고리즘이 높은 상관관계와 결정계수

Table 3. Comparison with observation based land surface temperature and estimated land surface temperature by split-window algorithms

Date	Time(LST)	Algorithm	R	R ²
2005.04.23.	1150	Wan	0.958	0.918
		Price	0.869	0.755
		Becker and Li	0.887	0.787
		Ulivieri et al.	0.909	0.862
	2255	Wan	0.759	0.576
		Price	0.909	0.826
		Becker and Li	0.865	0.748
		Ulivieri et al.	0.862	0.743
2005.08.28.	1105	Wan	0.891	0.794
		Price	0.850	0.723
		Becker and Li	0.830	0.689
		Ulivieri et al.	0.853	0.728
	2210	Wan	0.733	0.537
		Price	0.705	0.562
		Becker and Li	0.733	0.537
		Ulivieri et al.	0.750	0.563
2005.10.24.	1100	Wan	0.920	0.846
		Price	0.798	0.637
		Becker and Li	0.837	0.700
		Ulivieri et al.	0.866	0.750
	2205	Wan	0.780	0.608
		Price	0.754	0.569
		Becker and Li	0.734	0.539
		Ulivieri et al.	0.760	0.578
2005.11.25.	1100	Wan	0.922	0.850
		Price	0.675	0.456
		Becker and Li	0.751	0.564
		Ulivieri et al.	0.806	0.650
	2205	Wan	0.879	0.773
		Price	0.821	0.674
		Becker and Li	0.832	0.692
		Ulivieri et al.	0.864	0.746

를 나타내었다. Price 알고리즘의 경우, 봄철 야간에 상관계수와 결정계수가 각각 0.91과 0.83으로 높게 나타났고, 가을과 겨울의 경우에는 다른 알고리즘에 비하여 낮은 상관관계가 나타났다. Becker와 Li 알고리즘의 경우 계절적 특성을 나타내고 있지 않으며 상관계수와 결정계수가 Ulivieri 등의 알고리즘에 비하여 낮게 나타났으며 Price에 비하여 높게 나타났다.

앞에서 살펴본 바와 같이 Wan의 알고리즘이 관측치를 이용하여 추정된 지표면 온도가 가장 높은 상

관관계와 결정계수를 나타냈으며, 다음으로 Ulivieri 등의 알고리즘이 높게 나타났다. 위성에서 산출된 지표면 온도와 관측치를 이용하여 추정된 지표면 온도의 상관관계는 비교적 높게 나타났으나, 계절별, 주·야간별로 알고리즘에 따라 유동적으로 차이를 나타내고 있는 것으로 나타났다. 그러나 국지적인 상세한 분석에서는 Fig. 7에서 본 바와 같이 기상학적인 환경을 정확히 분석하여 이를 알고리즘에 반영하여야 한다.

5. 결 론

자료 획득의 용이성과 반복성이라는 장점을 가진 위성관측의 이용이 확대되고 있으며 특히 기상학 및 대기환경학 연구에 필요한 자료중 하나인 지표면 온도를 위성관측자료를 통하여 관측하는 연구가 활발하다. 현재 위성관측자료를 실제 지표면 온도로 변화하는데 필요한 다양한 산출알고리즘이 제시되고 있다. 본 연구에서는 현재 주요하게 사용되는 4가지 지표면 온도 산출 알고리즘을 적용하여 한반도 지역의 지표면 온도를 계산하였다. 이를 통하여 알고리즘의 특징을 분석하고, 한반도 지역의 지표면 온도산출 정확도를 평가하였다.

연구에 사용된 위성자료는 총 9회의 Aqua와 Terra위성 MODIS자료를 이용하였다. 그리고 1 km 해상도를 가진 근적외영상의 디지털 값을 적용하여 지표면 온도를 산출하였다. 지표면 온도는 Price, Becker와 Li, Ulivieri 등, Wan이 제시한 알고리즘을 토대로 계산되었다.

각 알고리즘에 의하여 계산된 지표면 온도는 명확한 계절 변화를 나타내고, 도시지역, 산악지역, 경작지 등 토지이용에 따른 지표면 온도 변화 역시 잘 표현된다. 그러나 각 알고리즘간의 상관연구에서 알고리즘 상호간의 지표면 온도 차이가 나타난다. Wan의 알고리즘에 비하여 Price의 알고리즘은 지표면 온도의 지역적인 편차를 매우 높게 추정한다. 그리고 Becker와 Li의 알고리즘은 Wan의 알고리즘에 비하여 지표면 온도를 1-2 °C 정도 높게 추정하는 경향이 있다. 반면 Ulivieri의 방법에 의하여 추정된 지표면 온도는 Wan의 알고리즘과 유사한 경향성을 나타낸다. 그리고 이 두 알고리즘에 의한 한반도 전체의 지표면 온도의 추정 폭이 평균 17 °C 정도로 매우 작게 나타난다.

그러나 한반도 전체적으로 볼 때 Ulivieri와 Wan의 계산 지표면 온도는 매우 유사한 경향성을 보이지만, 국지적인 관점 즉 도시규모에서 비교하면, 관측지점의 지리적인 위치와 기상학적인 요인에 따라 일치하지 않는다. 그리고 알고리즘에 관계없이 대체적으로 고온의 지표면 온도 영역에서는 일치도가 높은 경향을 나타낸다.

직접적인 지표면 온도관측자료 획득이 불가능하

기 때문에 관측 기온자료와 지표면 온도자료를 이용한 회귀식을 통하여 각 알고리즘의 정확도를 검증하였다. 검증 결과 Wan의 알고리즘의 R^2 가 전체 절을 통하여 높게 나타나며 봄철 낮시간 동안에 최대 0.92로 높은 일치도를 보였다. 그리고 Ulivieri의 알고리즘의 결정계수 역시 최대 0.86으로 높게 나타났다.

지표면 온도는 지표면 열수지식을 통하여 대기경계층의 열적인 환경평가에 매우 중요하다. 그러나 직접적인 관측이 어렵기 때문에 간접적인 방법을 주로 사용하는데 위성자료를 통한 추정 역시 유용한 자료가 될 수 있다. 비록 연구에 사용된 위성자료의 빈도는 적지만, 지표면 온도 추정 알고리즘의 경향성을 알 수 있으며, 본 연구 결과를 통하여 중규모 또는 미세규모 기상학 연구의 지표면 열수지연구의 기초자료로 이용될 수 있으리라 본다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지원(과제번호 R01-2006-000-10104-0)으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) Ichinose T., Shimonodozono K., Hanaki K., 1999, Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmos. Environ.*, 33, 3897-3909.
- 2) 이순환, 이화운, 김유근, 2002, 복잡지형에서 도시화에 따른 대기오염확산에 관한 시뮬레이션, *한국대기환경학회지*, 18(2), 67-83.
- 3) 김해동, 이송옥, 구현숙, 2003, 대규모 주택단지내의 인공구조물에 의한 승온화 효과에 관한 연구, *한국환경과학회*, 12(7), 705-71.
- 4) Mikami T., 2005, *Urban Abnormal Climate of Tokyo*, Yosen sha press, 95.
- 5) 이용식, 1990, 도시열섬 분석에 있어서 원격탐사기법의 적용에 관한 연구, 석사학위논문, 환경계획학과, 서울대학교, 서울.
- 6) 박인환, 장갑수, 김종용, 1999, 추이대를 중심으로한 경상북도 3개 도시열섬평가, *한국환경평가학회*, 8(2), 73-82.
- 7) 조명희, 이광재, 김운수, 2001, 위성탐사자료와 GIS를 활용한 도시표면 온도의 공간적 분포 특성에 관한 연구, *한국지리정보학회*, 4(1), 56-65.
- 8) 박민호, 2001, LANDSAT TM 열적의 데이터를 이

- 용한 도시열섬현상에 관한 연구 - 서울시를 대상으로 -, 대한토목학회논문집, 21(6), 861-874.
- 9) 김해동, 임진옥, 이순환, 2006, 위성 자료를 이용한 대구광역시의 상대적 증발산 효율 분포, 한국환경과학회지, 27(6), 677-686.
 - 10) Vogt J. V., Viau A. A., Paquet F., 1997, Mapping regional air temperature fields using satellite driven surface skin temperature, *Int. J. Climate*, 17, 1559- 1579.
 - 11) 김해동, 2001, 우포늪이 주변 기후환경완화에 미치는 효과, 환경과학논집, 6(1), 99-106.
 - 12) Han K. S., Viau A. A., Anctil F., 2003, High resolution forest fire weather index computations using satellite remote sensing, *Can. J. Forest Res.*, 33, 1134-1143.
 - 13) 변민정, 한경수, 김영섭, 2004, 위성자료를 이용한 일 최고온도 산출의 통계적 접근에 관한 고찰, 한국원격탐사학회, 20(2), 65-76.
 - 14) Ha K. J., Og H. M., Kim K. Y., 2001, Inter-annual and intra annual variabilities of NDVI, LAI, and Ts estimated by AVHRR in Korea, *Korean J. Remote Sens.*, 17(2), 111-119.
 - 15) 경기개발연구원, 2002, 아리랑1호(KOMPSAT-1) 위성영상 자료체계 구축 및 방안, 경기개발연구원보, 24-26.
 - 16) 염종민, 한경수, 김영섭, 2005, 한반도 식생에 대한 MODIS 250m 자료의 BRDF효과에 대한 반사도 정규화, 한국원격탐사학회지, 21(6), 445-456.
 - 17) Wan Z., Zhang Y., Zhang O., Li Z. L., 2002, Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data, *Remote Sens. Environ.*, 83, 163-180.
 - 18) Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z. L., 2004, Quality assessment and validation of the MODIS global land-surface temperature, *Int. J. Remote Sens.*, 25(1), 261-274.
 - 19) Li Z. L., Jia L., Wan Z., Zhang R., 2003, A new approach for retrieving precipitable water from ATSR-2 split-window channel data over land area, *Int. J. Remote Sens.*, 24(24), 5095-5117.
 - 20) Price J. C., 1984, Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer, *Journal of Geophysical Research*, 89, 7231-3237.
 - 21) Becker F., Li Z. L., 1990, Toward a local split window method over land surface, *Int. J. Remote Sens.*, 11(3), 369-393.
 - 22) Ulivieri C., Castronouvo M. M., Francioni R., Cardillo A., 1994, A split-window algorithm for estimating land surface temperature from satellites, *Advances in Space Research*, 14(3), 59-65.
 - 23) 김소희, 2006, 기상위성자료를 이용한 지표면온도 산출 알고리즘의 상호비교, 석사학위논문, 대기과학과, 공주대학교, 공주.
 - 24) Wan Z., 2003, Land surface temperature products users' guide, Technical report, Institute for Computational Earth System Science, University of California, Santa Barbara.