

Landsat 위성영상을 이용한 지표온도차 추정기법

박승환* · 정형섭*[†] · 신한섭**

*서울시립대학교 공간정보공학과, **중앙항공업 기술사업팀

An Efficient Method to Estimate Land Surface Temperature Difference (LSTD) Using Landsat Satellite Images

Sung-Hwan Park*, Hyung-Sup Jung*[†] and Han-Sup Shin**

*Department of Geoinformatics, The University of Seoul, **Technical Business Department, Chung-Ang Aerosurvey

Abstract : Difficulties of emissivity determination and atmospheric correction degrade the estimation accuracy of land surface temperature (LST). That is, since the emissivity determination of land surface material and the correction of atmospheric effect are not perfect, it is very difficult to estimate the precise LST from a thermal infrared image such as Landsat TM and ETM+, ASTER, etc. In this study, we propose an efficient method to estimate land surface temperature difference (LSTD) rather than LST from Landsat thermal band images. This method is based on the assumptions that 1) atmospheric effects are same over a image and 2) the emissivity of vegetation region is 0.99. To validate the performance of the proposed method, error sensitive analysis according to error variations of reference land surface temperature and the water vapor is performed. The results show that the estimated LSTD have respectively the errors of $\pm 0.06K$, $\pm 0.15K$ and $\pm 0.30K$ when the water vapor error of $\pm 0.302g/cm^2$ and the radiance differences of 0.2, 0.5 and $1.0Wm^{-2}sr^{-1}\mu m$ are considered. And also the errors of the LSTD estimation are respectively $\pm 0.037K$, $\pm 0.089K$, $\pm 0.168K$ in the reference land surface temperature error of $\pm 2.41K$. Therefore, the proposed method enables to estimate the LSTD with the accuracy of less than 0.5K.

Key Words : Landsat, Thermal-infrared, Land Surface Temperature, Mt. Baekdu

요약 : 복사율 및 대기효과는 대상지표의 온도 추정에 오차를 발생시키는 주요 원인이 된다. 일반적인 경우, 대상지표에 대한 정확한 복사율 정보를 알 수 없으므로, 단일밴드로 이루어진 열적외선영상으로부터 대상지표의 정확한 온도를 추정하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 대상지표의 온도를 추정하기보다는 Landsat 위성영상을 이용한 지표 간 지표온도차 추정기법을 제안하고자 한다. 연구를 위하여 대기효과가 전체영상에 동일하게 적용된다고 가정하였다. 수분량 및 온도의 오차로부터 제안된 기법에 대한 오차분석을 수행하였다. 오차분석 결과, 수분량의 오차범위가 $\pm 0.302g/cm^2$ 일 때, 제안된 기법의 오차는 복사휘도차이가 0.2, 0.5 및 $1.0Wm^{-2}sr^{-1}\mu m$ 일 때 각각 약 $\pm 0.06K$, $\pm 0.15K$, $\pm 0.30K$ 임을 보였다. 또

접수일(2013년 3월 19일), 수정일(1차 : 2013년 4월 15일), 게재확정일(2013년 4월 19일).

[†] 교신저자: 정형섭(hsjjung@uos.ac.kr)

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.

한, 온도의 오차가 $\pm 2.41\text{K}$ 일 때, 온도차의 오차범위는 복사휘도차이가 0.2, 0.5 및 $1.0\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}$ 일 때 각각 약 $\pm 0.037\text{K}$, $\pm 0.089\text{K}$, $\pm 0.168\text{K}$ 이고, 온도차의 오차가 $\pm 0.56\text{K}$ 일 때에는 약 $\pm 0.008\text{K}$, $\pm 0.020\text{K}$, $\pm 0.038\text{K}$ 의 오차가 있음을 보였다. 이는 제안된 기법이 높은 정밀도로 지표 간 지표온도차를 추정할 수 있음을 의미한다.

1. 서론

절대온도 0K 이상을 지니는 모든 지표는 복사에너지를 방출한다. 지구가 방출하는 복사에너지는 지표온도(Land Surface Temperature, LST)에 대한 정보를 담고 있기 때문에, 대기증발산(evapotranspiration), 기후변화, 물순환, 황사탐지, 도심열섬현상 분석, 화산활동 모니터링 등 지표온도와 밀접한 분야에 활용될 수 있다(Yoon *et al.*, 2009; Hong *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2013; Zhukov *et al.*, 2006). 위성영상을 이용하여 지표온도에 대한 정보를 수집하기 위해서는 지표에서 방출하는 복사에너지의 파장대역에 대한 이해가 요구된다. 일반적으로 지구를 300K의 흑체에 가깝다고 가정할 수 있으므로, 빈의 변위법칙에 의하여 최대복사에너지를 방출하는 파장대역은 $9.7\mu\text{m}$ 일 것이다. 따라서 위성영상을 이용하여 지표온도를 관측하기 위해서는, 열적외선 파장대역(8-14 μm)에 대한 정보를 수집할 수 있는 열적외선센서를 이용하는 것이 효율적이다(McMillin, 1975).

그러나 열적외선센서를 이용하여 측정된 온도는 대상지표에서 방출하는 복사에너지로부터 추정된 방사온도(radiant temperature)로, 대상지표에서 직접 측정된 운동온도(true kinetic temperature)와는 차이가 있다. 이러한 차이가 나타나는 원인 중 하나는 실세계의 대상지표의 복사율(emissivity; 방출율)에 의한 것으로, 복사율이란 동일온도에서 흑체가 방출하는 총 복사에너지와 실세계의 대상지표가 방출하는 총 에너지의 비로 정의된다(Li and Becker, 1993). 동일 운동온도를 지니는 지표라도 색상(color), 표면거칠기(surface roughness), 수분함유량(moisture content) 등에 따라 복사율이 다르기 때문에, 대상지표의 온도를 측정하기 위해서는 대상지표의 복사율이 필수적으로 요구된다(Ottle and Stroll, 1993). 해수 표면 온도(Sea Surface Temperature, SST) 추정 경우, 해수는 거의 동일한 복사율을 지니기 때문에 위성영상을 이용한 온도측정이 수월하지만, 지표온도의 추정은 복사율이 지표마

다 다르기 때문에 어려우며, 정밀도에 한계가 존재한다(Gillespie *et al.*, 1998). 또 다른 원인 중 하나는 대기효과에 의한 것으로, 대상지표로부터 방출된 복사에너지는 대기의 산란(scattering), 흡수(absorption) 및 굴절(refraction)에 의해 감쇠가 되어 열적외선센서에 수집되기 때문이다. 따라서 열적외선센서를 통해 수집된 영상은 대기효과, 복사율 및 온도에 따른 함수가 되며, 온도를 추정하기 위해서는 대기효과의 보정 및 대상지표의 복사율이 추정되어야 한다(Vidal, 1991). 따라서 기존의 연구는 다양한 알고리즘을 이용하여 대기효과 보정 및 복사율을 추정하여 왔다.

Sobrino *et al.*(1994)는 split-window 알고리즘을 이용하여 지표온도를 추정하였다. 이 방법은 파장대역이 다른 다중밴드의 열적외선영상이 동일한 운동온도를 가진 대상지표를 관측하였을 때, 대기 중 수분량에 의해 수집된 복사휘도 값(radiance)이 차이가 나는 것을 이용하는 방법이다. 이 알고리즘은 대기자료를 사용하지 않는 장점이 있지만, 다중밴드의 열적외선영상이 요구된다는 단점이 있다. Qin *et al.*(2001)은 mono-window 알고리즘을 이용하여 Landsat TM 열적외선영상에 대한 수분량에 따른 대기투과율, 상향복사량, 하향복사량과 같은 대기파라미터를 보정하였고, 이 알고리즘의 오차는 $\pm 2.41\text{K}$ 로 알려져 있다. Jimenez-Munoz and Sobrino(2003)는 single-channel 알고리즘을 이용하여 지표온도를 추정하였다. 사용영상으로 Landsat TM의 열적외선영상을 이용하였다. Landsat TM의 경우 단 하나의 열적외선밴드(TIR band)를 지니고 있기 때문에 지표온도와 복사율을 동시에 추정할 수 없다. 따라서 적색밴드(Red band)와 근적외선밴드(NIR band)를 이용한 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)로부터 복사율을 계산하고, 계산된 복사율을 이용하여 지표온도를 추정하였으며, 이 알고리즘의 오차는 $\pm 0.56\text{K}$ 로 mono-window 알고리즘보다 정밀한 것으로 알려져 있다.

그러나 이들 방법은 대상지표의 복사율을 정밀하

계 계산할 수 없다는 단점이 존재한다. 특히 육지의 경우, 지표면은 다양한 물질로 이루어져 큰 이질성을 갖기 때문에, 복사율 값을 결정하기에 어려움이 있다 (Park *et al.*, 2008). 정확한 복사율 정보가 주어지지 않는 경우, 추정된 온도의 오차는 매우 커질 수 있다. 일반적인 경우, 대상지표에 대한 정확한 복사율 정보를 알 수 없으므로, 단일밴드로 이루어진 열적외선영상으로부터 정확한 온도를 추정하는 것은 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 단일밴드의 열적외선영상 내 임의의 점을 기준지표로 정하고, 이로부터 정밀한 지표온도차를 구하는 방법을 제안한다. 이때 지표온도차(Land Surface Temperature Difference, LSTD)란 기준지표의 온도와 대상지표의 온도차이를 의미한다. 동일 복사율을 지닌 지표의 경우, 기준지표의 지표온도가 영상촬영 시각에 따라 변하는 만큼 대상지표의 지표온도 또한 같은 양만큼 변할 것이므로, 다수의 영상 간 기준지표의 온도차이를 고려하지 않아도 된다는 장점이 있다. 따라서 이 기법은 1) 대기효과가 전체영상에 동일하다는 가정과 2) 대상지표로 복사율이 상대적으로 잘 알려진 식생지역을 타겟으로 제한한다. 이 기법은 1) RED영상과 근적외선영상의 대기보정, 2) 정규식생지수 계산과 타겟지역 추출, 4) single-channel 알고리즘에 의한 기준지표온도 추정, 5) 온도차 기준점 설정 및 6) 지표온도차도 생성을 포함하여 이루어진다. 이

기법은 기준지표와 대상지표를 차분하기 때문에, 대기 변화에 민감하지 않는 장점이 있으며, 기준지표와 대상지표가 복사율 값이 비교적 높은 식생지역으로 타겟 지역을 한정함으로써 단일밴드의 열적외선영상에서도 정밀한 지표온도차를 추정할 수 있는 장점이 있다. 이는 곧 현장관측을 이용하여 기준지표의 정확한 지표온도를 측정할 수 있다면, 기준지표의 지표온도에 추정된 지표온도차를 합산하는 방법으로 대상지표의 지표온도를 정밀히 추정할 수 있음을 의미한다.

2. 제안 기법

본 연구에서 제안하는 기법은 Landsat 위성영상을 이용하여 높은 복사율을 지니는 식생지역에서의 정밀 지표온도차를 추정하는 방법으로 다음의 단계를 포함한다(Fig. 1):

- 1) 영상기반 대기보정
- 2) NDVI 계산
- 3) 열적외선영상의 대기투과율 계산
- 4) 기준지표온도 추정
- 5) 지표온도차 추정

1) 영상기반 대기보정

일반적으로 지표에 대한 복사율은 NDVI를 이용하

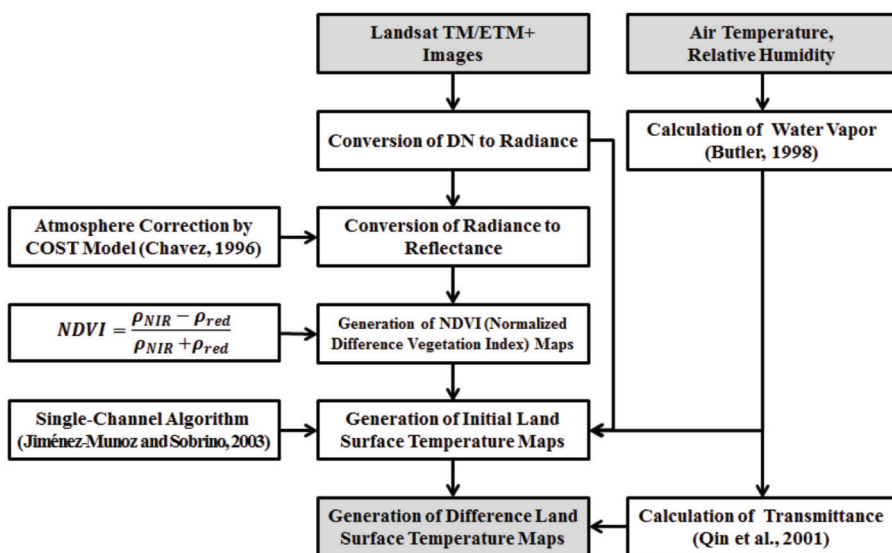


Fig. 1. Detailed work flow of the proposed method

여 계산한다. 이 NDVI는 RED영상과 근적외선영상의 반사도 차이비로부터 식생분포를 알 수 있지만, 각 영상이 대기효과를 지니고 있기 때문에 이에 대한 보정이 요구된다. 일반적으로 대기에 의한 영향을 보정하기 위한 방법은 대기모델기반 대기보정과 영상기반 대기보정 방법이 있다. 대기모델을 이용하는 방법은 MODTRAN과 같은 대기모델을 이용하여 대기투과율, 대기의 상향복사량, 하향복사량 등을 구하여 보정하는 방법으로, 정밀한 대기효과보정을 수행할 수 있다는 장점이 있으나 정밀 물리 대기자료가 필요한 단점이 있다. 반면, 영상기반 대기보정기법은 직접적인 대기자료가 필요하지 않고, 영상에서 근사적으로 대기효과를 계산하는 방법이다. 이 방법은 쉽고 빠르게 보정할 수 있지만, 정확도가 떨어지며, 대부분 Chavez(1996)가 제안한 cosine approximation model(COST)의 활용도가 높다. 본 연구에서는 NDVI를 계산하기 위하여 영상의 대기보정을 적용하는 것으로 정밀한 대기보정이 요구되지 않기 때문에 영상기반하의 COST 모델을 이용하여 대기효과를 보정한다.

2) NDVI 계산

Sobrino *et al.*(2000)은 NDVI로부터 지표의 복사율을 계산하는 방법을 제안하였다. NDVI는 식생이 적색 파장대역에서의 반사율은 낮고, 근적외선 파장대역의 반사율은 높음을 이용하는 방법으로 다음과 같이 정의된다.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

여기서 ρ_{NIR} 와 ρ_{RED} 은 근적외선과 적색 영상의 반사율을 의미한다. Landsat의 경우 근적외선영상은 4번 밴드에 해당하고 적색영상은 3번 밴드에 해당한다.

Landsat5 TM과 7 ETM+ 열적외선영상의 복사율(ϵ)은 다음과 같이 계산할 수 있다(Sobrino *et al.*, 2000).

$$\epsilon = 0.004P_v + 0.986 \quad (2)$$

여기서 P_v 는 식생비율로 다음과 같이 정의된다.

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad (3)$$

여기서 $NDVI_{max}$ 는 정규식생지수의 최대값이고, $NDVI_{min}$ 는 정규식생지수의 최소값이다.

정규식생지수가 0.5이상인 경우, 대상지표는 거의

식생으로만 구성되어 있다고 가정할 수 있으며, Landsat의 열적외선파장대역인 10.5-12.5 μm 에서는 거의 0.99에 해당하는 복사율을 지닌다(Sobrino *et al.*, 1990).

3) 열적외선영상의 대기투과율 계산

대기온도와 상대습도를 이용한 수분량(water vapor, h)은 다음과 같다(Buder, 1998).

$$h = \frac{P_0}{\rho_w g} \quad (4)$$

여기서 h 의 단위는 g/cm^2 , ρ_w 는 물의 밀도로 $1g/cm^3$, g 는 중력가속도로 $9.8m/s^2$ 이며, P_0 는 수분압을 나타내고 아래와 같이 정의된다.

$$P_0 = \exp\left(1.81 + \frac{17.27T_d}{T_d + 237.3}\right) \quad (5)$$

여기서 T_d 는 이슬점온도를 나타내고, 아래와 같이 정의된다.

$$T_d = \frac{b\gamma}{a - \gamma} \quad (6)$$

여기서 a 와 b 는 상수로서 각각 17.27, 237.7이고, γ 는 기온과 상대습도를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\gamma = \frac{aT_a}{b + T_a} (RH/100) \quad (7)$$

여기서 RH 는 상대습도를, T_a 는 대기온도(air temperature)를 나타낸다.

Qin *et al.*(2001)은 Landsat 열적외선영상에 활용할 수 있는 수분량에 따른 대기투과율 근사식을 제안하였으며, 아래와 같이 정의된다.

$$\tau = 0.974290 - 0.08007h \quad (\text{high air temperature}) \quad (8a)$$

$$\tau = 0.982007 - 0.09611h \quad (\text{low air temperature}) \quad (8b)$$

식 (8)은 수분량이 0.4-1.6 g/cm^2 일 경우에만 사용이 가능하며, 예상되는 대기투과율 오차는 ± 0.029 이다(Qin *et al.*, 2001).

4) 기준지표온도 추정

본 연구에서 제안하는 지표온도차 추정기법은 기준지표온도로부터 대상지표온도를 차분하여 지표온도차를 추정하는 기법으로 기준지표의 온도를 요구한다. Landsat 영상의 온도를 추정하는 기법에는 크게 mono-window알고리즘과, single-channel알고리즘이 있다. Mono-window알고리즘은 single-channel알고리즘에 비해 간단하게 온도를 추정할 수 있지만 정밀도는 $\pm 2.41K$ 로 상대적으로 낮다고 알려져 있다(Sobrino *et*

al.,2004). 반면 single-channel알고리즘을 이용한 기준지표의 온도 추정은 $\pm 0.56K$ 의 정밀도를 지니고, mono-window알고리즘보다 더 정밀한 측정을 수행할 수 있다(Sobrino *et al.*, 2004). 따라서 본 연구에서는 single-channel알고리즘을 이용하여 기준지표온도를 추정하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$T_s^{ref} = \gamma[(\epsilon_\lambda^{ref})^{-1} (\psi_1 L_\lambda^{ref} + \psi_2) + \psi_3] + \delta \quad (9)$$

여기서, T_s^{ref} 는 기준지표온도를 의미하며, ϵ_λ^{ref} 는 기준지표의 파장에 따른 복사율, L_λ^{ref} 는 기준지표의 복사휘도, ψ_1, ψ_2 및 ψ_3 는 대기파라미터 이며, γ 과 δ 는 기준지표의 복사휘도(L_λ^{ref}) 및 유효파장대역(λ)으로 이루어진 함수이다.

5) 지표온도차 추정

일반적으로 Landsat 열적외선센서에서 수집한 복사휘도는 지표에서 방출된 복사휘도와 대기와 지표에서 반사된 복사휘도의 합으로 표현된다(Park *et al.*, 2013).

$$L_\lambda^{ref} = [\epsilon_\lambda^{ref} B_\lambda(T_s^{ref}) + (1 - \epsilon_\lambda^{ref}) E_{d\downarrow}] \tau_\lambda + E_{d\uparrow} \quad (10a)$$

$$L_\lambda^{target} = [\epsilon_\lambda^{target} B_\lambda(T_s^{target}) + (1 - \epsilon_\lambda^{target}) E_{d\downarrow}] \tau_\lambda + E_{d\uparrow} \quad (10b)$$

여기서, L_λ^{ref} 와 L_λ^{target} 은 각각 기준지표와 대상지표로부터 열적외선센서에 기록된 파장에 따른 복사휘도, $B_\lambda(T_s^{ref})$ 와 $B_\lambda(T_s^{target})$ 는 플랑크 함수(Planck's function)로써 기준지표온도와 대상지표온도에 따른 흑체복사량, τ_λ 는 파장에 따른 대기투과율, ϵ_λ^{ref} 와 $\epsilon_\lambda^{target}$ 은 기준지표와 대상지표에서의 파장에 따른 복사율, $E_{d\downarrow}$ 는 대기의 하향복사량 및 $E_{d\uparrow}$ 는 대기의 상향복사량을 나타낸다.

제안하는 방법은 식 (2)에 의하여 복사율을 0.99로 정의할 수 있는 식생지수가 높은 지역에 대하여 지표온도차를 계산하는 방법이다. 따라서 기준지표와 대상지표로부터 열적외선센서에 기록된 파장에 따른 복사휘도의 차이는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$dL_\lambda = [B_\lambda(dT_s + T_s^{ref}) - B_\lambda(T_s^{ref})] \epsilon_\lambda \tau_\lambda \quad (11)$$

여기서, $dL_\lambda = L_\lambda^{target} - L_\lambda^{ref}$ 와 $dT_s = T_s^{target} - T_s^{ref}$, ϵ_λ 는 식생지역의 복사율로 0.99로 가정된다. 이때, 플랑크함수로부터 $B_\lambda(dT_s + T_s^{ref})$ 를 정의할 수 있다.

$$B_\lambda(dT_s + T_s^{ref}) = \frac{2hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda(dT_s + T_s^{ref})}\right) - 1} \quad (12)$$

여기서, λ 는 대상영상의 유효파장대역이고, h 는 $6.626068 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, k 는 $1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/deg}$, c 는 $2.997925 \times 10^8 \text{ m/s}$ 이다. 식(12)을 dT_s 로 정리하면 그 식은 다음과 같다.

$$dT_s = \frac{\frac{K2}{K1}}{\ln\left(\frac{K2}{B_\lambda(dT_s + T_s^{ref})} + 1\right)} - T_s^{ref} \quad (13)$$

여기서, $K1 = 2hc^2 \lambda^{-5}$ 이고, $K2 = hc/k\lambda$ 이다. Landsat5 TM의 경우 $K1$ 은 607.76, $K2$ 는 1260.56이고, Landsat7 ETM+의 경우 $K1$ 은 666.09, $K2$ 는 1282.71로 정의된다. 또한, 식(12)을 $B_\lambda(dT_s + T_s^{ref})$ 로 정리하면 그 식은 다음과 같다.

$$B_\lambda(dT_s + T_s^{ref}) = \frac{dL_\lambda}{\epsilon_\lambda^{ref} \tau_\lambda} + B_\lambda(T_s^{ref}) \quad (14)$$

식(14)에서 또한 플랑크함수로부터 정의할 수 있다.

$$B_\lambda(T_s^{ref}) = \frac{K1}{\exp\left(\frac{K2}{T_s^{ref}}\right) - 1} \quad (15)$$

식(15)를 식(14)에 대입하여 정리하면,

$$B_\lambda(dT_s + T_s^{ref}) = \frac{dL_\lambda}{\epsilon_\lambda^{ref} \tau_\lambda} + \frac{K1}{\exp\left(\frac{K2}{T_s^{ref}}\right) - 1} \quad (16)$$

최종적으로, 식(16)를 식(13)에 대입하면 기준지표와 대상지표의 지표온도차를 추정할 수 있다.

$$dT_s = \frac{\left(\frac{K2}{\frac{dL_\lambda}{\epsilon_\lambda^{ref} \tau_\lambda} + \frac{K1}{\exp\left(\frac{K2}{T_s^{ref}}\right) - 1}} + 1\right)}{\ln\left(\frac{K2}{B_\lambda(dT_s + T_s^{ref})} + 1\right)} - T_s^{ref} \quad (17)$$

결국 우리는 식(17)을 이용하여 지표온도차를 계산할 수 있다. 이 수식으로부터 지표온도차 추출은 1) 기준지표와 대상지표의 복사휘도 차이(dL_λ), 2) 복사율($\epsilon \approx 0.99$), 3) 대기투과율(τ_λ) 및 4) 기준지표온도(T_s^{ref})의 함수이다. 우리가 식생지역 내에서 지표온도차를 계산한다면, 복사율은 약 0.99로 근사적으로 동일하다고 가정할 수 있고, 따라서 미지변수는 대기투과율과 기준지표온도이다. 그러나 우리가 대기온도와 상대습도를 알 수 있다면, 식 (4)로부터 수분량을 계산할 수 있고, 수분량에서 대기투과율을 계산할 수 있으며, 예상되는 대기투과율 오차는 ± 0.029 정도이다(Qin *et al.*, 2001). 또한, 기준지표온도는 single-channel알고리즘을

이용할 경우, $\pm 0.56K$ 의 정밀도로 관측이 가능하다. 그러므로 제안하는 기법으로 계산된 지표온도차는 정밀하게 추정될 수 있다.

3. 실험결과

지표온도차 추정기법의 오차민감도분석을 위하여 수분량과 기준지표온도의 오차변화에 따른 지표온도차의 오차변화를 관측하였다. 오차민감도분석은 중위도 지방의 일반적인 대기 상태를 고려하여 복사율은 0.99, 기준지표온도는 293.15K 및 수분량은 $1.1g/cm^2$ 로 설정하고, 기준지표와 대상지표 간 복사휘도 차이가 0.2, 0.5 및 $1.0Wm^{-2}sr^{-1}\mu m$ 일 때에 대하여 수행하였다. Fig. 2(a)는 수분량 오차의 변화에 따른 지표온도차(LSTD)의 오차를 나타내고, Fig. 2(b)는 기준온도 오차변화에 따른 LSTD의 오차를 나타낸다.

Fig. 2로부터 지표온도차의 오차는 1) 복사휘도차가 클수록, 2) 수분량 오차가 클수록, 3) 기준온도오차가 클수록 증가하는 것을 알 수 있다. Qin *et al.*,(2001)은 대기투과율 오차가 ± 0.029 임을 나타냈고, 이에 해당하

는 수분량 오차는 $\pm 0.302g/cm^2$ 이다. 결국 복사휘도차이가 0.2, 0.5 및 $1.0Wm^{-2}sr^{-1}\mu m$ 일 때 지표온도차의 오차는 각각 약 $\pm 0.06K$, $\pm 0.15K$, $\pm 0.30K$ 에 해당한다. 또한, 기준지표온도의 경우 mono-window를 이용하여 기준지표온도를 구하였을 때 오차는 $\pm 2.41K$, single-channel을 이용하여 기준지표온도를 구하였을 때 오차는 $\pm 0.56K$ 로 알려져 있다(Sobrino *et al.*, 2004). 최대 오차를 고려한 지표온도차의 오차는 mono-window의 경우 각 복사휘도차에 따라 약 $\pm 0.037K$, $\pm 0.089K$, $\pm 0.168K$ 의 오차를 보인다.

그러므로 이러한 결과는 제안하는 방법에 의한 지표온도차는 복사휘도차이가 1.0 이하(8도 이하)인 지역에서 0.3K이하로 계산할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 제안방법의 지표온도차가 정밀하다는 것을 의미한다.

제안된 기법을 실제데이터에 적용하기 위하여 연구지역을 선정하였다. 본 연구에서는 식생지역을 타겟지역으로 한정하였으므로, 오랜기간동안 식생지역에 대한 큰 변화가 없으며, 식생지역이 넓게 분포한 지역선정이 요구된다. 따라서 동북아시아에 위치한 백두산을 연구지역으로 선정하였다. 백두산은 오랜기간 동안 큰 변화가 없으며, 주변부에 식생지역이 넓게 분포되어있기 때문에 본 연구지역으로 매우 적합하다.

백두산은 중국과 북한의 국경선에 해당하며, N 41° 01', E 128° 05' 에 위치한다(Fig. 3). 고도는 2,750m로 알려져 있으며, 정상부에는 과거 화산분화에 의하여 생성된 칼데라호인 천지가 있다. 기온은 연평균 기온이 $-7.3^{\circ}C$ 이며, 연평균 상대습도는 78% 정도이다. 기후는 고산기후로 한반도내에서 가장 기후변화가 심한 지역이며, 여름에는 안개와 강수가 빈번하게 일어난다(Lee and Yun, 2011).

지표온도차 추정기법을 적용하기 위해서 1992년 9월 22일 부터 2012년 10월 7일까지 총 14장의 Landsat TM 및 ETM+ 영상자료를 획득하였다. 백두산의 경우, 월별 기온변화가 심하기 때문에 획득한 영상자료를 월별로 분류하였다. 또한 해당지역에 대한 접근이 불가능하기 때문에, 지표온도차 기법을 적용하기 위해 필요한 기온과 습도자료는 세계기후데이터센터인 TuTiempo.net(<http://www.tutiempo.net/en/climate>)에서 수집하였다(Table. 1).

지표온도차 추정기법 적용을 위해, 백두산 천지를

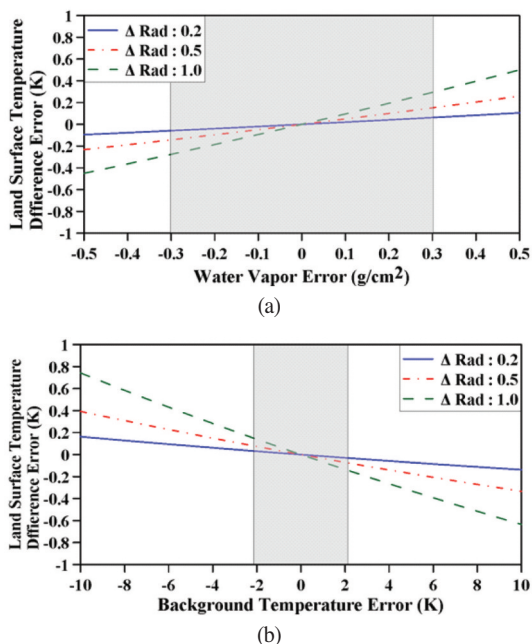


Fig. 2. Variations of land surface temperature difference (LSTD) errors according to (a) water vapor error and (b) reference land surface temperature error

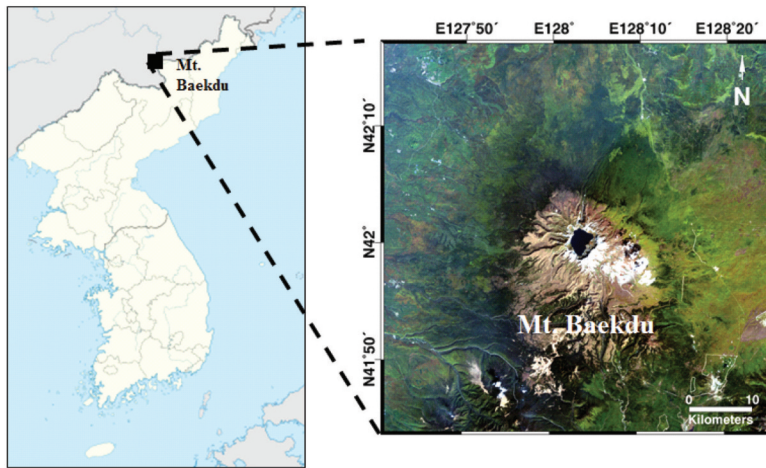


Fig. 3. Location map of Mt. Baekdu

Table. 1. Landsat TM and ETM+ used for this study. The mean air temperature and mean relative humidity are extracted from the acquisition time of the Landsat data. The Landsat data is divided into four groups: group A, B, C and D.

Group	Date	Sensor	mean air temperature (°C)	mean relative humidity(%)
A	1999-06-30	ETM+	22.6	58
	2004-06-11	ETM+	21.0	51
B	2000-08-27	TM	19.6	81
	2002-08-25	ETM+	18.2	79
	2007-08-23	ETM+	18.2	78
	2008-08-25	ETM+	17.7	69
C	1992-09-22	TM	11.1	68
	2006-09-05	ETM+	11.6	76
	2006-09-21	ETM+	12.0	48
	2009-09-29	ETM+	11.0	51
	2011-09-27	TM	12.9	57
D	2005-10-04	ETM+	9.4	44
	2009-10-15	ETM+	8.5	53
	2012-10-07	ETM+	7.5	54

흑체로 선정한 COST 대기보정이 수행되었고, 식생지수영상을 제작하였다. Fig. 4는 월별 식생지수영상 중 대표영상이다. 또한 수집한 일평균기온과 일평균습도자료로부터 수분량과 대기투과율을 계산하였다. 각각의 영상에서 동일한 위치의 임의의 점을 기준지표로 선정하여 기준지표온도를 추정하였으며, 이때 정밀도가 $\pm 0.56K$ 로 알려진 single-channel 알고리즘을 이용하였다. 이로부터 각 영상에서 선정한 기준지표

와 영상 내 대상지표들 간의 복사휘도의 차이를 계산하였다. 마지막으로, 지표온도차 추정기법을 이용하여 각 영상에서 기준지표와 대상지표 간의 지표온도차를 추정하였다. Fig. 5는 이러한 과정을 통해 제작된 지표온도차 결과이다.

결과에서 볼 수 있듯이, 제작된 지표온도차영상은 각 월별 기온의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 또한 백두산 북쪽의 지표온도는 낮은 경향을 보이는데, 이러한 원인은 백두산쪽으로 가까워질수록 높아지는 고도에 의한 것으로 생각된다. 또한 구름은 마스크가 잘 되었지만 백두산 동쪽에 위치한 나대지의 경우 마스크가 잘 수행되지 않았으며, 이러한 문제는 이러한 나대지도 NDVI 값이 높게 나타났기 때문이다. Fig. 6는 획득한 Landsat 영상자료를 이용하여 제작한 월별 평균지표온도차 영상이다.

지표온도차 영상들 중 Fig. 5의 1999년 6월 지표온도차영상과 2000년 8월의 지표온도차영상은 다른 지표온도차영상에는 없는 특성이 나타남을 발견하였다. 이를 정량적으로 확인하기 위하여 월별 평균지표온도차영상과 1999년 6월, 2000년 8월의 지표온도차영상을 차분하였다. Fig. 7(a)은 월별 평균지표온도차영상으로부터 1999년 6월의 지표온도차영상과 2000년 8월의 지표온도차영상을 차분한 결과이고, Fig. 7(b)는 차분한 결과로부터 프로파일을 이용하여 지표온도차 변화를 나타낸 그래프이다.

Fig. 7(a)의 결과로부터 백두산에 주변의 지표온도가 상승함을 알 수 있었다. 이는 Fig. 7(b)의 프로파일에서

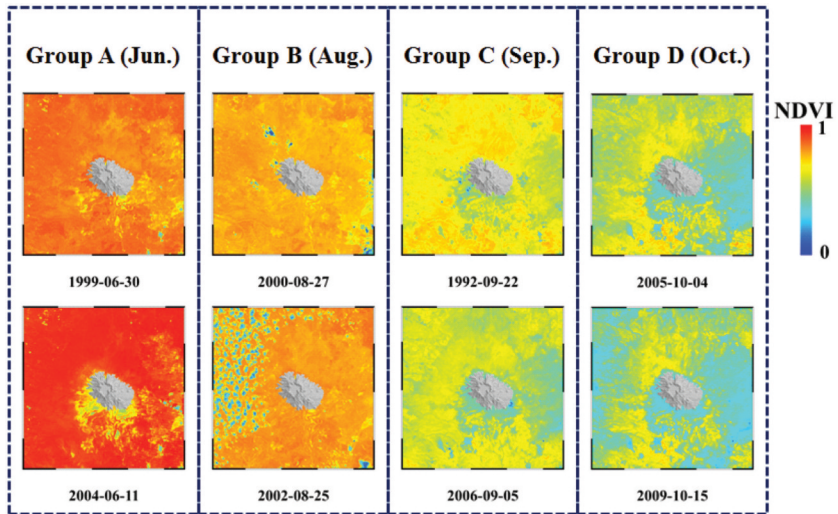


Fig. 4. Examples of normalized difference vegetation index (NDVI) maps created from the Landsat images used for this study.

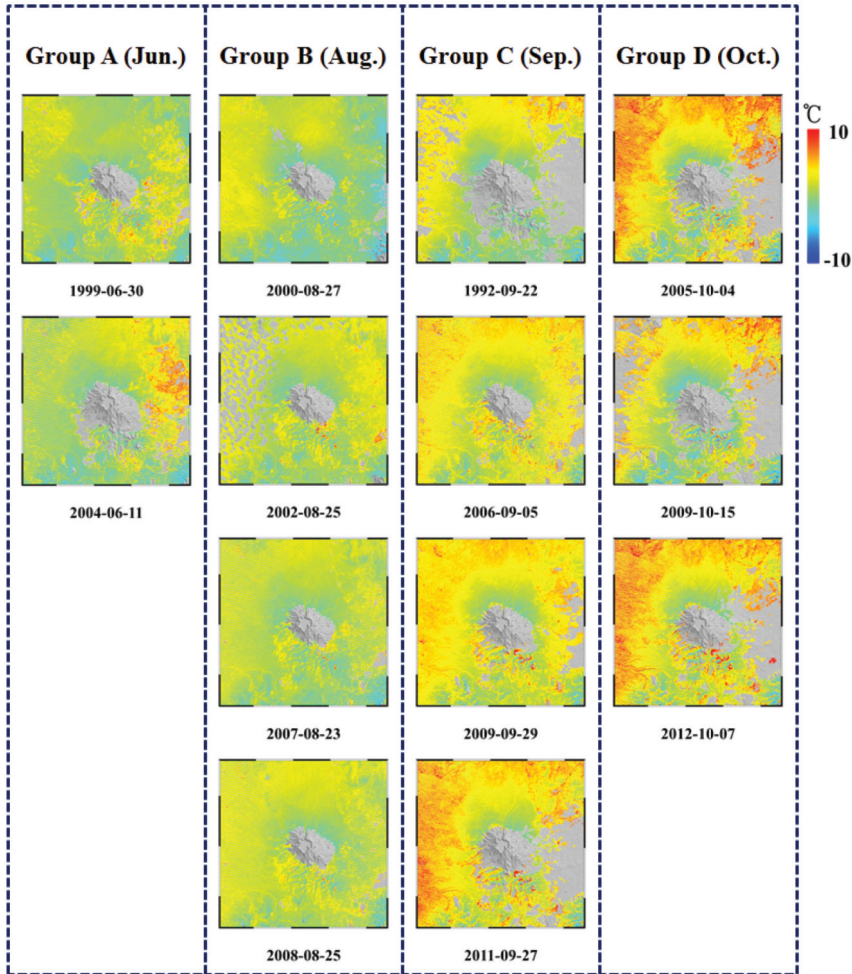


Fig. 5. Land surface temperature difference (LSTD) maps estimated from the Landsat thermal infrared (TIR) images over Mt. Baekdu by the proposed method.

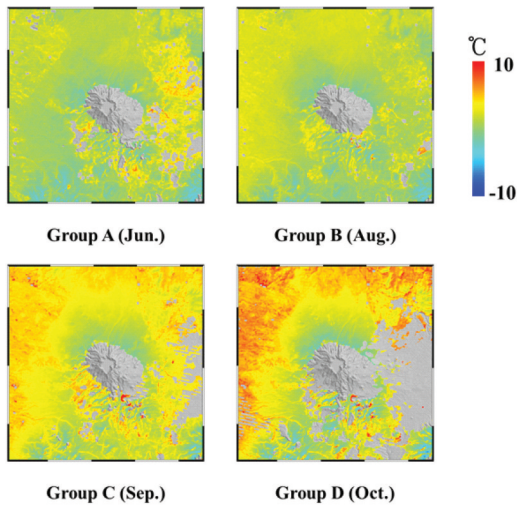


Fig. 6. Monthly-averaged LSTD maps that are calculated from LSTD maps of Fig. 5.

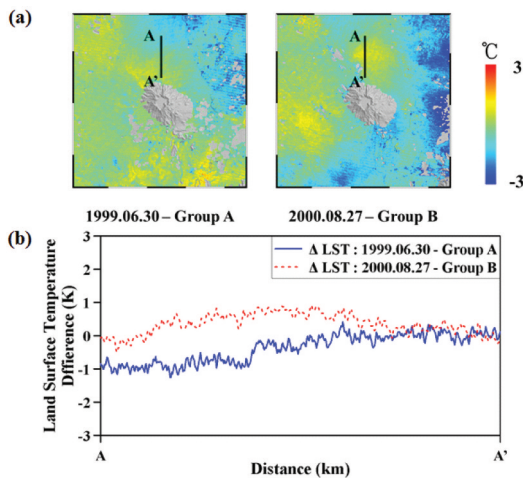


Fig. 7. (a) Difference maps between LSTD map of 1999.06.30 and the corresponding monthly-averaged LSTD map and LSTD map of 2000.08.27 and the corresponding monthly-averaged LSTD map, and (b) the profiles A-A' of the difference maps.

도 확인할 수 있으며, 상승한 온도는 약 1K를 나타냈지만, 추정기법의 정밀도한계로 인하여 이는 단순오차일 가능성이 존재한다. 그러나 해당영상이 다른 지표 온도차영상에는 없는 특성이 나타나는 것으로 미루어 보았을 때, 백두산 화산의 변화에 의하여 기인하였다고 생각할 수도 있다. 이러한 유추는 1) 연구지역인 백두산의 경우 1999년부터 2002년까지 469건의 미세지진이 관측되었는 점과(Wu *et al.*, 2003), 2) 마그마의 이동에 의하여 지표온도의 변화가 발생할 수 있다는

점에서 기인한다. 1999년 6월과 2000년 8월의 지표온도차영상의 경우 많은 미세지진이 발생한 시기에 포함되므로(Wu *et al.*, 2003), 다른 지표온도차영상과 다른 특성을 지니게 된 원인이 단순오차가 아닌 마그마의 움직임에 의한 영향으로서 나타난 것일 수도 있다고 조심스럽게 판단한다.

4. 결론

본 연구에서는 Landsat 위성영상을 이용한 지표온도차 추정기법을 제안하고자 하였다. 연구를 위하여 대기효과가 전체영상에 동일하게 적용된다고 가정하였고, 지표온도차를 추정하기 위한 타겟지역으로 복사율이 잘 알려진 식생지역을 선정하였다. 또한 수분량, 기준지표온도의 오차범위를 이용하여 제안된 지표온도차 추정기법의 오차범위를 분석하였다. 백두산지역에 대하여 제안된 추정기법을 적용하였으며, 이로부터 백두산지역에 대한 지표온도차영상을 제작하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 수분량의 오차범위가 $\pm 0.302\text{g}/\text{cm}^2$ 일 때, 제안된 지표온도차 추정기법의 오차범위는 기준지표와 대상지표의 복사휘도차이가 0.2, 0.5 및 $1.0\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}$ 일 때 각각 약 $\pm 0.06\text{K}$, $\pm 0.15\text{K}$, $\pm 0.30\text{K}$ 임을 보였다.

둘째, 기준지표의 온도 추정오차가 $\pm 2.41\text{K}$ 일 때, 지표온도차의 오차범위는 복사휘도차이가 0.2, 0.5 및 $1.0\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}$ 일 때 각각 약 $\pm 0.037\text{K}$, $\pm 0.089\text{K}$, $\pm 0.168\text{K}$ 이고, 온도 추정오차가 $\pm 0.56\text{K}$ 이며 복사휘도차이가 0.2, 0.5, 1.0일 때 오차범위는 각각 약 $\pm 0.008\text{K}$, $\pm 0.020\text{K}$, $\pm 0.038\text{K}$ 임을 보였다. 이는 제안된 기법이 높은 정밀도도 지표온도차를 추정할 수 있음을 의미한다.

셋째, 제작된 14장의 지표온도차영상 중, 1999년 6월, 2000년 8월의 지표온도차영상의 경우, 월별 평균 지표온도차영상과 다른 특성을 보였으며, 프로파일을 이용한 결과에서 약 1K의 온도변화를 보였다. 이 시기는 백두산의 미세지진이 발생된 시기로서, 온도변화는 마그마의 영향일 수도 있지만, 정밀도의 한계로 인한 단순오차일 가능성도 배제할 수 없으리라 사료된다.

사사

본 연구는 소방방재청의 백두산화산대응기술개발 사업인 ‘화산재해 대응시스템개발’ [NEMA-백두산-2012-3-2]과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Buttler, B., 1998. Precipitable water at the VLA - 1990-1998, VLA Scientific Memo, 176.
- Chavez, P.S., 1996. Image-based atmospheric corrections - revisited and improved, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9): 1025-1036.
- Gillespie, A., S. Rokugawa, T. Matsunaga, J.S. Cothorn, S. Hook and A. B. Kahle, 1998. A Temperature and Emissivity Separation Algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1113-1126.
- Hong, S.H., J.H. Kim and J.S. Ha, 2010. Possibility of applying infrared background threshold values for detecting asian dust in spring from geostationary satellite, *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(4): 387-394.
- Jimenez-Munoz, J.C. and J.A. Sobrino, 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *Journal of Geophysical Research*, 108: 4688-4695.
- Lee, S.-H. and S.-H. Yun, 2011. Impact Meteorological Wind Fields Acerage on Predicting Volcanic Tephra Dipersion of Mt. Baekdu, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 32(4): 360-372 (in Korean with English abstract).
- Li, Z. L. and F. Becker, 1993. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data, *Remote Sensing of Environment*, 43: 67-85.
- Li, Z.L., B.H. Tang, H. Wu, H. Ren, G. Yan, Z. Wan, I.F. Trigo and J. A. Sobrino, 2013. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives, *Remote Sensing of Environment*, 131: 14-37.
- McMillin, L.M., 1975. Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorptions, *Journal of Geophysical Research*, 80: 5113-5117.
- Ottle, C and M. Stroll, 1993. Effect of atmospheric absorption and surface emissivity of the determination of land surface temperature from infrared satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 14: 2025-2037.
- Park, W., Y.-K. Lee, J.-S. Won, S.-G. Lee, J.-M. Kim, 2008. A basic study for the retrieval of surface temperature from single channel middle-infrared images, *Korean Journal of Remote Sensing*, 24(2): 189-194 (in Korean with English abstract).
- Park, W., J.-S. Won, H.-S. Jung, 2013. Retrieval of Relative Surface Temperature from Single-channel Middle-infrared (MIR) Images, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(1): 95-104 (in Korean with English abstract).
- Qin, Z., A. Karnieli and P. Berliner, 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region, *International Journal of Remote Sensing*, 22(18): 3719-3746.
- Sobrino, J.A., V. Caselles and F. Becker, 1990. Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 44(6): 343-354.
- Sobrino, J.A., Z.L. Li, M.P. Stoll and F. Becker, 1994. Improvements in the Split-Window Technique for Land Surface Temperature Determination, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(2): 243-253.

- Sobrino, J.A. and N. Raissouni, 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco, *International Journal of Remote Sensing*, 21: 353-366.
- Sobrino, J.A., J.C. Jimenez-Munoz and L. Paolini, 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5, *Remote Sensing of Environment*, 90: 434-440.
- Vidal, A., 1991. Atmospheric and emissivity correction of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 12: 2449-2460.
- Wu, J., Y. Ming, Y.M. Liu, S. Qi and S. Yuan, 2003. A study on the micro-earthquake swarm occurring on Aug. 20, 2002 in Changbaishan Tianchi volcano, *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 24: 1-8. (in Chinese).
- Yoon, S., J.-H. Ryu, J.-E. Min, Y.-H. Ahn, S. Lee and J.-S. Won, 2009. Monitoring of the Sea Surface Temperature in the Saemangeum Sea Area Using the Thermal Infrared Satellite Data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 25(4): 339-357 (in Korean with English abstract).
- Zhukov, B., E. Lorenz, D. Oertel, M. Wooster and G. Roberts, 2006. Spaceborne detection and characterization of fires during the bi-spectral infrared detection (BIRD) experimental small satellite mission (2001–2004), *Remote Sensing of Environment*, 100: 29-51.