단일밴드 중적외선 영상으로부터 표면온도 추정을 위한 상대온도추정알고리즘의 연구

박 옥* · 원중선* · 정형섭**

*연세대학교 지구시스템과학과, **서울시립대학교 공간정보공학과

Retrieval of Relative Surface Temperature from Single-channel Middle-infrared (MIR) Images

Park, Wook*, Joong-Sun Won* and Hyung-Sup Jung**

*Department of Earth System Sciences, Yonsei University, **Department of Geo-Informatics, University of Seoul

Abstract : In this study, a novel method is proposed for retrieving relative surface temperature from single-channel middle infra-red (MIR, 3-5 μm) remotely sensed data. In order to retrieve absolute temperature from MIR data, it is necessary to accommodate at least atmospheric effects, surface emissivity and reflected solar radiance. Instead of retrieving kinematic temperature of each target, we propose an alternative to retrieve the relative temperature between two targets. The core idea is to minimize atmospheric effects by assuming that the differential at-sensor radiance between two targets experiences the same atmospheric effects. To reduce effective simplify atmospheric parameters, each atmospheric parameter was examined by MODTRAN and MIR emissivity derived from ASTER spectral libraries. Simulation results provided a required accuracy of 2 K for materials with a temperature of 300 K within 0.1 emissivity errors. The algorithm was tested using MODIS band 23 MIR day time images for validation. The accuracy of retrieved relative temperature was 0.485 ± 1.552 K. The results demonstrated that the proposed algorithm was able to produce relative temperature with a required accuracy from only single-channel radiance data. However, this method has limitations when applied to materials having very low temperatures using day time MIR images.

Key Words : Middle infrared (MIR), relative temperature, single-channel, MODIS, remote sensing

요약 : 3-5 μm 파장대의 중적외선 영상으로부터 정밀한 절대온도를 추정하기 위해서는 지표 복사율, 대기효과, 낮 영상의 경우 반사되는 태양빛에 대한 정보를 필요로 하며, 이는 온도 추정 시 오차를 발생시키는 주요 원인이 된다. 이 연구는 이를 해결하기 위해 상대적인 온도 차이를 추정하는 방법을 제안하고자 한다. 제안된 알고리즘의 기본 방향은 온도 추정을 위한 입력자료를 최소화 시키는 것이다. 이를 위해 인접한 지역에 위치한 두 대상물체가 받는 대기효과는 동일하다고 가정하였으며 MODTRAN 및 ASTER spectral library로부터 입력자료를 단순화 시키는 연구가 수행되었다. 시뮬레이션 연구 결과 제안된 상대온도추정 알고리즘의 정밀도는 300 K의 온도에서 0.1의 지표 복사율 오차에 대해 2 K 이내의 비교적 높은 정밀도를

접수일(2012년 11월 12일), 수정일(1차 : 2012년 12월 18일), 게재확정일(2012년 12월 19일).

† 교신저자: 원중선(jswon@yonsei.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.

나타났다. 그러나 낮 영상에서 저온인 경우에는 정밀도가 크게 감소하였다. 알고리즘의 검증을 위해 MODIS band 23 중적외선 낮 영상에 적용하였으며, 이를 MODIS LST 자료와 비교를 수행한 결과 0.485 ± 1.552 K의 오차를 나타내었다. 이 결과로부터 제안된 알고리즘이 외부 입력자료를 필요로 하지 않고 단지 영상 만으로부터 비교적 높은 정밀도로 온도 추정이 가능함을 보였다. 그러나 제안된 알고리즘은 상대온도만을 알 수 있으며, 절대온도를 추정하기 위해서는 기준온도에 대한 정보가 필요하다는 한계점도 있다.

1. 서론

지표에서의 중적외선 파장대역($3-5 \mu\text{m}$) 신호는 열적외선이나 반사적외선과는 달리 태양복사의 반사된 에너지와 지표 자체의 복사에너지가 복합된 것으로 매우 다양한 정보를 제공 할 수 있다 (Boyd and Petitcolin, 2004). 또한 이 영역은 열적외선($8-15 \mu\text{m}$) 영역에 비해 높은 온도의 물체를 정밀하게 관측 할 수 있으므로 열점 감시나 산불탐지와 같은 재난 관측 분야에도 이용된다 (Mushkin *et al.*, 2005; Zhukov *et al.*, 2006). 적외선 영역으로부터 온도를 추정하기 위해서는 대기효과 및 지표의 복사율이 추정되어야 하며, 기존연구는 이러한 효과들을 제거하기 위해 두 개 이상의 다중밴드를 이용하여 TISIE (Temperature Independent Spectral Indices of Emissivity) (Becker and Li, 1990), Split-window (Sobrino *et al.*, 1994) 및 TES (Temperature and Emissivity Separation Algorithm) (Gillespie *et al.*, 1998)와 같은 알고리즘들이 개발되어 지표 온도 및 복사율을 추정하는 연구가 수행되었다.

중적외선 영상의 경우 낮에는 태양복사에 의한 반사 신호가 함께 포함되므로 이를 추가적으로 보정 해야 하는 어려움이 있다. 이를 위해 열적외선과 중적외선 파장대역을 동시에 관측하는 다중채널 방법 및 주간 관측자료를 이용한 Day-night algorithm (Wan *et al.*, 1999), MIR-NEM (The Mid-Infrared Normalized Emissivity Method) 알고리즘 (Mushkin *et al.*, 2005) 및 TISIE를 응용하여 (Petitcolin and Vermote, 2002) 지표의 반사도, 복사율 및 온도추정에 대한 연구가 수행된 바 있다. 그러나 이들은 다중밴드를 이용한 알고리즘이며, 이 연구에서 목표로 하는 단일밴드 중적외선 영상의 경우 이 방법들을 적용하기는 어렵다. 단일밴드 적외선 영상으로부터 지표온도를 추정하기 위해서는 대기효과 및 지표 복사율에 대한 독립된 외부자료를 사용하는 방법들이

적용되어 왔다. 단일밴드 적외선의 온도추정 연구는 Landsat 열적외선 영상으로부터 많은 연구가 수행되어 왔는데 Qin *et al.* (2001)은 Mono-window 알고리즘을 통하여 Landsat TM 적외선 밴드에 대하여 수분율에 따른 대기의 투과율, 상향복사량, 하향복사량과 같은 파라미터를 보정하였고, Jiménez-Muñoz와 Sobrino (2003) 역시 Generalized single-channel 방법을 제안하면서 수분율에 따른 대기 파라미터 들의 회귀식을 제안하여 Landsat TM, AVHRR, ATSR2 및 ASTER 자료에 적용한 바 있다. 또한 정밀한 온도를 추정하기 위해 지표 복사율을 활용하는 방법에 대한 연구가 수행되어 왔다. 이는 지표 복사율의 경우 Planck's 함수로부터 (N+1)개 미지수 문제를 풀어야 하기 때문에 단일밴드 적외선의 경우 외부 자료의 입력이 필수적이다. Landsat의 경우 이전부터 연구되어온 NDVI와 열적외선 밴드의 지표 복사율간의 상관관계를 이용하여 온도 추정 시 복사율 자료를 입력하는데 사용해 왔다 (Van de Griend and Owe, 1993; Valor and Caselles, 1996; Sobrino *et al.*, 2004). 그러나 NDVI 값을 획득할 수 없는 센서의 경우 이 방법을 적용하기는 어려우며, 또한 중적외선 파장대역에서의 복사율과 NDVI와의 상관관계는 아직 명확히 연구된 바 없다.

현재까지는 단일밴드 중적외선 시스템의 온도 및 복사율 추정에 대한 알고리즘은 거의 연구가 이루어지지 못한 상태이다. 특히, 낮 영상의 경우에는 반사되는 태양복사량에 의한 효과가 매우 크기 때문에 이를 활용한 사례는 현재까지는 거의 없다. 그러나 국내의 경우 다목적실용위성 3A호에 고해상도 단일밴드 중적외선 센서를 탑재하게 되며, 이 시스템을 목표로 한 온도 추정, 표적 탐지에 관한 연구들이 수행된 바 있다 (Park *et al.*, 2008; Baek and Jang, 2012).

이 연구에서는 단일밴드 중적외선 영상을 활용하기 위한 상대온도 추정 알고리즘을 제안하고자 한다. 단

일밴드를 이용한 온도추정과 관련된 기존의 연구 방법과 결과에서는 여러 가지 단점이 존재한다. 대기보정을 위한 외부 입력자료가 필요한 점, 중적외선 파장대역의 특성상 지표 복사율의 편차가 열적외선 파장대역에 비해 매우 크다는 점, 약 300K 내외의 온도를 측정할 경우 열적외선 파장대역에 비해 에너지가 작아 오차가 커질 수 있는 문제점이 있다. 그리고 가장 큰 문제점은 낮 영상의 경우 태양복사량의 반사신호가 차지하는 비중이 크기 때문에 이를 보정하기 어려운 점이다. 따라서, 대부분의 온도추정 알고리즘이 목표로 하는 2 K 이내의 정밀한 온도 추정은 쉽지 않음을 예상할 수 있다.

이 연구에서는 기존 연구결과를 토대로 두 가지 방향성을 제시하고자 한다. 첫째는 지표의 절대온도 추정이 어렵다면 비교 대상 물체간의 상대온도를 추정하는 방법을 제안하고, 둘째는 대기 파라미터 및 지표 복사율과 같은 외부 파라미터를 최소화 하여 정밀도를 개선하고 간단한 형태의 상대온도 추정 알고리즘을 개발하는 것이다.

2. 이론적 고찰

중적외선의 파장대역의 복사전달방정식 (Radiative transfer equation)에서 센서에 입사되는 총 복사량 (At-sensor radiance)은 태양 복사의 지표 반사와 지표의 복사량이 모두 고려되어야 한다 (Boyd and Petitcolin, 2004). 이를 식 (1)에 나타내었으며, 이 연구에서는 Lambertian surface를 가정하여 수식을 축약하였다.

$$L_{\lambda}^{at-sensor} = [\varepsilon_{\lambda} B(\lambda, T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda})(L_{\lambda}^{atm \downarrow} + L_{\lambda}^{Sunirr \downarrow})] \tau_{\lambda} + L_{\lambda}^{atm \uparrow} \quad (1)$$

여기서, ε_{λ} 는 지표복사율, $B(\lambda, T_s)$ 는 Planck 함수로써 지표 온도에 따른 흑체 복사량, $L_{\lambda}^{Sunirr \downarrow}$ 는 지표에 입사되는 태양복사량, τ_{λ} 는 대기투과율, 그리고 $L_{\lambda}^{atm \downarrow}$ 와 $L_{\lambda}^{atm \uparrow}$ 는 각각 대기의 하향 복사량 및 상향복사량이다. Planck's 함수인 $B(\lambda, T_s)$ 의 경우 수식으로 나타내면,

$$B(\lambda, T_s) = \frac{2hc^2 \lambda^{-5}}{\exp(\frac{hc}{k\lambda T_s}) - 1} \quad (2)$$

과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서, $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 이고, $c = 3.00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 이다. Planck 함수인 $B(\lambda, T_s)$ 의 단위는 $\text{Wm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 이며,

이때, λ 는 μm 단위이다. 여기서 상대온도를 추정하기 위해서 두 물체 Target1과 Target2에 대한 각각의 복사전달 방정식을 아래의 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{\lambda, Target1}^{at-sensor} &= [\varepsilon_{\lambda, Target1} B(\lambda, T_{s, Target1}) + (1 - \varepsilon_{\lambda, Target1}) \\ &\quad (L_{\lambda, Target1}^{atm \downarrow} + L_{\lambda, Target1}^{Sunirr \downarrow})] \tau_{\lambda, Target1} + L_{\lambda, Target1}^{atm \uparrow} \\ L_{\lambda, Target2}^{at-sensor} &= [\varepsilon_{\lambda, Target2} B(\lambda, T_{s, Target2}) + (1 - \varepsilon_{\lambda, Target2}) \\ &\quad (L_{\lambda, Target2}^{atm \downarrow} + L_{\lambda, Target2}^{Sunirr \downarrow})] \tau_{\lambda, Target2} + L_{\lambda, Target2}^{atm \uparrow} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 두 물체 간의 상대적인 온도 차이를 센서도달 복사량의 차이 ($L_{\lambda, Target1}^{at-sensor} - L_{\lambda, Target2}^{at-sensor}$)로부터 추정하는데 기본적인 가정은 고해상도 영상임을 고려하여 영상의 관측지역이 넓지 않다면 두 물체가 동일한 대기 효과를 받는 것으로 한다. 이 경우 식 (3)의 두 물체에 대한 복사량의 차이는 다음 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} L_{\lambda, Target1}^{at-sensor} - L_{\lambda, Target2}^{at-sensor} &= [\varepsilon_{\lambda, Target1} B(\lambda, T_{s, Target1}) \\ &\quad - \varepsilon_{\lambda, Target2} B(\lambda, T_{s, Target2})] \cdot \tau_{\lambda, Target1, 2} \\ &\quad + [(1 - \varepsilon_{\lambda, Target1})(L_{\lambda, Target1}^{atm \downarrow} + L_{\lambda, Target1}^{Sunirr \downarrow}) \\ &\quad - (1 - \varepsilon_{\lambda, Target2})(L_{\lambda, Target2}^{atm \downarrow} + L_{\lambda, Target2}^{Sunirr \downarrow})] \cdot \tau_{\lambda, Target1, 2} \\ &\quad + (L_{\lambda, Target1}^{atm \uparrow} - L_{\lambda, Target2}^{atm \uparrow}) \end{aligned} \quad (4)$$

이때 앞서 언급한 대기효과가 같다는 가정에 의해 $L_{\lambda, Target1}^{atm \downarrow} = L_{\lambda, Target2}^{atm \downarrow}$, $L_{\lambda, Target1}^{Sunirr \downarrow} = L_{\lambda, Target2}^{Sunirr \downarrow}$, $L_{\lambda, Target1}^{atm \uparrow} = L_{\lambda, Target2}^{atm \uparrow}$ 이므로 이를 소거하면, 다음 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} dL_{\lambda, Target1 - Target2}^{at-sensor} &= [\varepsilon_{\lambda, Target1} B(\lambda, T_{s, Target1}) \\ &\quad - \varepsilon_{\lambda, Target2} B(\lambda, T_{s, Target2}) - (\varepsilon_{\lambda, Target1} - \varepsilon_{\lambda, Target2}) \\ &\quad (L_{\lambda, Target1, 2}^{atm \downarrow} + L_{\lambda, Target1, 2}^{Sunirr \downarrow})] \cdot \tau_{\lambda, Target1, 2} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$dT_s = T_{s, Target1} - T_{s, Target2} \quad (6)$$

$$d\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda, Target1} - \varepsilon_{\lambda, Target2} \quad (7)$$

식 (5)에 식 (2), (6), (7)을 대입하면 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} dL_{\lambda, Target1 - Target2}^{at-sensor} &= \left[\frac{(\varepsilon_{\lambda, Target2} + d\varepsilon_{\lambda}) 2hc^2 \lambda^{-5}}{\exp(\frac{hc}{k\lambda(T_{s, Target2} + dT_s)}) - 1} - \frac{\varepsilon_{\lambda, Target2} 2hc^2 \lambda^{-5}}{\exp(\frac{hc}{k\lambda T_{s, Target2}}) - 1} - d\varepsilon_{\lambda} (L_{\lambda, Target1, 2}^{atm \downarrow} + L_{\lambda, Target1, 2}^{Sunirr \downarrow}) \right] \cdot \tau_{\lambda} \end{aligned} \quad (8)$$

만약, 식 (8)에서 비교하는 두 물체의 복사율이 매우 유사한 경우 $\varepsilon_{\lambda, Target1} \approx \varepsilon_{\lambda, Target2}$ 의 조건이 성립한다면

$d\epsilon_\lambda=0$ 에 수렴하며, 따라서 이에 따른 영향은 상대온도 차이로 나타날 것이다. 여기에 대한 분석은 다음 절에 하기로 하며, 이를 식으로 나타내면 다음 식 (9)와 같다.

$$dL_{\lambda, Target1-Target2}^{at-sensor} = \left[\frac{2hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda(T_{s, Target2} + dT_s)}\right) - 1} - \frac{2hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T_{s, Target2}}\right) - 1} \right] \cdot \tau_\lambda \cdot \epsilon_\lambda \quad (9)$$

식 (9)를 다시 온도에 관하여 정리하면, 최종적으로 다음과 같은 식 (10)이 얻어지게 된다.

$$dT_s = - \frac{hc}{k\lambda \cdot \ln \left[\frac{2hc^2 \lambda^{-5}}{\left(\frac{dL_{\lambda, Target1-Target2}^{at-sensor}}{\tau_\lambda \epsilon_\lambda} + B(\lambda, T_{s, Target2}) \right)} + 1 \right]} T_{s, Target2} \quad (10)$$

식 (10)으로부터, 상대온도 복원 대상물체가 같은 복사율을 갖는 경우에는 상대적인 온도차이가 정밀하게 추정될 것으로 기대할 수 있으며, 그렇지 않은 경우에는 복사율의 차이만큼 오차가 추가될 것이다. 그 크기는 낮 영상의 경우 반사되는 태양복사량에 의해 밤 영상에 비해 크게 나타날 것이다. 그러나 여기서 발생되는 오차는 $d\epsilon_\lambda$ 로부터 발생되므로 공통되는 크기의 복사율 만큼의 대기효과가 차이가 제거되기 때문에 절대 온도를 추정하는 경우에 비해 오차를 감소시킬 수 있다는 장점이 있다.

3. 상대 온도 추정 알고리즘 및 오차 분석

1) 대기효과 시뮬레이션 및 모델 근사화

식 (10)를 풀기 위해서는 대기투과율 (τ_λ)에 대한 값이 요구된다. 이를 위해 Fig. 1과 같이 3-5 μm 파장대역에서의 가상의 spectral response function을 갖는 센서의 경우를 가정하였다. Gauss 함수의 경우 끝부분이 0에 가깝게 수렴하기 때문에 이를 피하기 위해 Welch 함수를 사용하였으며, 이는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi(x) = 1 - \frac{x^2}{a_2}, \alpha = \frac{FWHM}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

여기서, Full-width at half-maximum (FWHM)의 값은 1.4 μm , 중심파장대역은 4.2 μm 이다.

일반적으로 중적외선 영역의 투과율에 영향을 미치

Fig. 1. Black line is Welch filter centered at 4200nm with a full-width-half-maximum (FWHM) value of 1400nm. Grey line represents atmospheric transmissivity spectrum from MODTRAN 4.0 using U.S. standard atmospheric model with clear-sky condition.

는 대기 요소로는 H_2O , CO_2 , O_3 , 에어로졸 같은 인자들이 있다. 특히, CO_2 의 경우 약 4.3 μm 에서 강한 흡수효과를 보이지만 CO_2 , O_3 와 같은 가스들은 대기 중 혼합비가 일정하므로 이에 대한 변화는 비교적 적을 것이다. 실제 MODTRAN으로부터 시뮬레이션 테스트를 수행한 결과 CO_2 와 O_3 의 경우 다른 파라미터는 동일한 조건하에서 H_2O 는 1.42 g/cm^2 으로 고정하고 각각 365 ± 50 ppm, O_3 는 330 ± 50 DU(Dobson Unit)의 변화를 주었을 때, 결과는 각각 0.008, 0.002 정도의 투과율 변화를 보이므로 두 파라미터의 영향은 무시 가능하다. 실질적으로 중적외선 파장대에서 가장 큰 영향을 미치는 인자는 대기 수분량 (precipitation water vapor contents)이며,

Fig. 2. Change of atmospheric transmissivity with water vapor contents in 4.2 μm region using Fig.1 spectral response function.

입력 값을 단순화 시키기 위해서 H₂O 양에 따른 투과율 및 하향복사량의 변화를 표준 대기모델 (U.S. standard model)에 수분량의 비율로 변화시키면서 계산 하였다. 시뮬레이션을 위해 사용된 입력 값은 H₂O는 0~4.0 g/cm², CO₂는 365 ppm, O₃는 330 DU, 에어로졸이 없는 Clear sky condition (no aerosol)을 가정하였다. 시뮬레이션 결과를 Fig. 2에 나타내었으며, 최대 투과율은 0.407, 최소 투과율은 0.335로 차이는 0.072로 나타났다.

따라서, 투과율은 다음과 같은 식 (12)로 모델화 할 수 있다.

$$\tau_{\lambda, Target1,2}(w) = a_1 w^2 + a_2 w + a_3 \quad (12)$$

여기서, $a_1=0.0026, a_2=-0.0276, a_3=0.4053$ 이다.

그러나 대기 중 수분율에 따른 투과율의 변화도 그 차이가 크지 않으므로 표준 대기모델로부터 산출되는 투과율 값인 0.371을 상수로 사용하는 것을 고려하였다.

2) 중적외선 파장대역의 복사율 분석

정확한 지표의 온도를 얻기 위해서는 복사율을 추정하는 것은 필수적이다. 이에 대한 연구는 열적외선인 경우 대부분의 물질의 복사율이 0.93-0.99로 그 차이를 무시하여 오차 값으로 간주하거나(Qin *et al.*, 2001; Jimenez-Munoz and Sobrino, 2003), 또는 이를 NDVI와 같은 외부 자료와의 관계로부터 입력자료로 사용하는 방법이 연구되어 왔다(Van de Griend and Owe 1993, Sobrino *et al.*, 2004). 그러나 이러한 외부자료로부터 복사율을 사용하는 방법은 국내 시스템의 경우 적용하기 어려운 상태이다.

3-5 μm 파장영역의 복사율 분석을 위해 ASTER spectral library중 하나인 JHU (Johns Hopkins University)에서 측정한 88개의 복사율 샘플 중 대표적인 9종의 분광스펙트럼에 대해 분석 하였다. 복사율을 계산하는 식은 식 (13)와 같으며, 이를 Table 1에 정리 하였다.

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \psi(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \psi(\lambda) d\lambda} \quad (13)$$

여기서, $\psi(\lambda)$ 는 spectral response function, $\varepsilon(\lambda)$ 는 spectral emissivity이다.

Table 1로부터 Green leaves 식생의 경우 대부분 0.98 내외의 일정한 높은 복사율을 가지고 있지만 수분함량

Table 1. The band effective middle-infrared emissivity as representative materials derived from spectral response function in Fig.1 and ASTER spectral library

Artificial materials	Emissivity	Natural materials	Emissivity
Concrete	0.9356	Conifer trees	0.9883
Asphalt	0.9158	Deciduous trees	0.9835
Construction cement	0.8812	Green grass	0.9848
		Dry grass	0.7943
		Liquid tap water	0.9768
		Solid ice	0.9757

에 따라 dry grass의 경우 0.80 이하의 낮은 복사율을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 식생의 수분함량이 복사율에 큰 영향을 미치는 것으로 기존 연구자들에 의해 알려져 있다 (Boyd and Petitcolin, 2002). 암석 및 토양, 콘크리트와 같은 인공구조물의 경우 구성 성분에 따라 5-25% 내외의 반사도 변화를 보이며 특히 석회석 성분 광물의 경우 4.0 μm , 석영의 경우 4.5-4.7 μm 영역 부근에서 특징적인 흡수를 보인다 (Salisbury and D'Aria, 1994).

상대온도 추정 시 외부입력 값을 최소화 할 수 있는 경우인 식 (10)을 이용하기 위해 Table 1의 물질들을 두 종류로 구분할 경우 한 그룹은 Water, ice 및 green vegetation으로 대부분의 자연물을 포함하는 그룹이며 약 0.98의 복사율을 갖는다. 반면 인공물, bare soil 및 dry grass 그룹은 Table 1로부터 0.03~0.19 가량의 복사율 차이가 발생하는데 이는 상대온도 추정 시 오차를 발생시키는 요인이 될 것이다.

3) 상대온도 추정 알고리즘의 최대오차 시뮬레이션 및 결과

알고리즘의 오차분석을 위해 시뮬레이션을 수행하였다. At-sensor radiance 시뮬레이션을 위해 설정한 지표 복사율은 0.8~0.99, 물체의 온도를 300 K로 가정하여 오차를 분석하였다. 대기모델은 표준대기 모델과 clear-sky 조건을 가정하였으며, 연구에 사용된 Spectral response function으로부터 계산된 투과율, 상향복사량 및 하향복사량은 각각 0.371, 0.364 $\text{Wm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 0.110 $\text{Wm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 로 계산 되었다.

낮 영상의 경우 태양 복사의 반사신호가 센서에 입사되는 모델은 일반적인 광학영상의 모델과 다르지 않으나 중적외선 영역의 경우 산란에 의해 발생하는 양

이 매우 적은 것으로 알려져 있다(Kaufman and Remer, 1994). 실제 MODTRAN 시뮬레이션으로부터 실험 한 결과 산란에 의해 발생하는 spectral diffuse sky irradiance, $E_{d\lambda}$ 의 경우 연구에 사용된 파장영역에서는 spectral solar irradiance에 비해서 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 배 정도로 그 크기가 작으므로, 식 (14)는 하향 투과율 및 Sun zenith angle에 의한 함수로 단순화 된다.

$$L_{\lambda, Target1,2}^{Sunirr \downarrow} = \frac{1}{\pi} (E_{0\lambda} \cdot \tau_{\lambda, Target1,2} \cdot \cos\theta_z) (\because E_{d\lambda} \approx 0) \quad (14)$$

여기서, $E_{0\lambda}$ 는 spectral solar irradiance, $\cos\theta_z$ 는 Sun zenith angle, $E_{d\lambda}$ 는 spectral diffuse sky irradiance 이다. 알고리즘의 최대오차를 추정하기 위해 낮 영상의 경우 태양의 Sun zenith angle은 0° 로 설정하였으며, 하향 투과율과 상향투과율이 같은 것을 가정하여 0.371의 투과율을 사용 하였을 때 $L_{\lambda, Target1,2}^{Sunirr \downarrow}$ 는 $1.421 \text{ Wm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 로 계산되었다. 계산된 각각의 파라미터로부터 시뮬레이션 된 at-sensor radiance로부터 지표 복사율 오차에 따른 상대온도를 계산하였다. 식 (10)으로부터 상대 온도 추정을 위해 입력해야 하는 자료는 대기투과율, 지표복사율, 물체간의 at-sensor radiance의 차이를 입력해야 한다. 앞의 3-1절과 3-2절에서 대기투과율 및 지표 복사율을 상수로 가정하였을 경우 상대 온도를 계산하는 데에는 외부자료 없이 단지 획득된 영상만이 필요하다는 것을 알 수 있다. 입력자료로 영상만을 필요로 하는 상대온도 추정의 오차는 식 (10)으로부터 지표 복

사율 및 대기 투과율과 관계가 있을 것이며 이를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 error bar는 추가적으로 투과율의 오차가 ± 0.036 인 조건 하에서 발생하는 오차이다.

Fig. 3의 결과로부터 300 K (27°C)의 온도대역에서는 어떠한 외부입력자료도 사용하지 않고 영상자체만으로도 야간의 경우는 지표 복사율과는 거의 무관하게 1 K이내의 정밀한 상대 온도를 추정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 하향 복사량이 지표복사량의 차이만큼 곱해질 경우 그 값이 매우 작아지기 때문인 것으로 생각된다. 주간 영상의 경우에도 복사율의 오차가 0.1이내인 경우 2 K이내로 상대온도를 추정할 수 있는 것으로 나타났다. Table 1로부터 Concrete, Asphalt, Construction cement의 경우 모두 복사율의 오차가 0.1이내인 것을 알 수 있으며, 이는 300 K의 온도에서 기준 복사율을 0.98로 가정할 경우에도 대부분의 경우 2 K이내로 상대 온도 추정이 가능함을 지시한다.

그러나, 파장대역을 고려해보면 중적외선의 경우 온도가 낮을수록 지표 복사량이 급격하게 감소하게 될 것이다. 이는 고정된 하향 복사량 및 태양복사량에 비하여 상대적으로 지표에서 방출하는 복사량이 크게 감소하는 것을 의미 하며, 결과적으로 복사율 오차에 따른 상대적 오차를 더욱 증가 시킬 것이라고 예상할 수 있다. 이를 확인하기 위해 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 사이의 다양한 온도 대역에서 기준 복사율을 0.98로 가정하여 실험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다. 여기서 음의 값은 실제 온도차이에 비해 측정된 온도가 더 크게 추정된 경우를 의미한다. 또한, 주간 영상의 경우 저온이 나타날 수 있는 조건을 가정하기 위해 Sun zenith angle을 65° 로 설정하였다.

Fig. 4에서 복사율이 0.9이상인 대부분의 경우에 야간영상은 -15°C 에서 45°C 이내의 온도를 갖는 물체간의 상대온도 추정은 2 K 이내로 가능한 것으로 나타났다. 그러나 주간 영상은 -15°C 조건에서 최대 약 7 K 정도의 오차가 발생할 수도 있다는 것을 알 수 있다. 특히 이러한 경향은 저온일수록 또한 복사율의 오차가 클수록 높게 나타난다. 이 결과로부터 겨울에 상대온도 추정 오차가 더 크게 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다. 만약 물체의 지표 복사율과 하향 복사량 및 태양 복사량을 모두 입력하게 되면 상대온도추정 정밀도는 향상될 것이다. 그러나 이 경우 요구되는 외부자료가 많아

Fig. 3. Relative surface temperature errors (dT_s) according to the errors of emissivity and atmospheric transmissivity.

(a)

(b)

Fig. 4. Relative surface temperature errors according to the errors of emissivity and target surface temperature. Negative values in contour line means overestimation: (a) Errors in nighttime and (b) error in daytime in winter (SZA=65°).

지므로 실제 적용이 복잡해지는 단점이 있다. 따라서 겨울철 지표 피복의 균질 성이 떨어지는 지역일 경우 계산되는 상대 온도는 오차를 감안 하여야 할 것이다.

4. 알고리즘 실제 적용 및 검증

이 연구에서 제안된 상대온도 추정 알고리즘을 테스트 하기 위해 NASA에서 제공하는 MODIS 중적외선 영

(a)

(b)

(c)

Fig. 5. (a) Relative temperature derived from MODIS LST product. (b) Relative temperature estimated from the proposed algorithm using MODIS band 23 MIR image. (c) Estimation error image between the proposed algorithm and MODIS LST data.

Fig. 6. Relative temperature from MODIS LST product versus the estimated relative temperature through the proposed algorithm using the MODIS band 23 image. A total of thousand random samples at same point were compared.

상을 이용하였다. 연구에 사용된 영상은 MODIS AQUA L1B 1KM 자료로 2011년 10월 4일 1시(Local time: KST)에 촬영된 주간 영상이며, 사용한 채널은 시뮬레이션 시 사용된 $4.2 \mu\text{m}$ 와 가장 가까운 $4.06 \mu\text{m}$ 를 중심파장으로 하는 Band 23 자료를 사용하였다. 검증에 위한 기준자료로는 MODIS의 적외선을 이용하여 지표 온도를 추정하는 표준 알고리즘이 적용된 MYD11A1 product (Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km)를 활용 하였다.

상대온도를 추정하기 위해 L1B radiance 영상으로부터 영상 중심에 임의의 식생지역으로 추정되는 임의의 기준점으로부터 at-sensor radiance값을 추출 하였다. 기준점의 복사량은 $0.5273 \text{ Wm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 이였으며 영상으로부터 이 값을 일괄적으로 곱하여 $dL^{\text{at-sensor}}$ 을 계산 하였다. 입력 파라미터로는 MODIS Band 23의 spectral response function으로부터 계산된 표준대기모델의 대기 투과율인 0.711과 자연물의 평균 지표 복사율인 0.98을 사용되었다. 그 결과는 Fig. 5에 나타내었으며, Fig. 5(a)는 MODIS LST로부터 L1B 영상의 기준점과 같은 지역의 기준 온도인 292.74 K (19.59 °C)를 뺀 상대 온도이며, Fig. 5(b)는 제안된 알고리즘으로부터 계산된 상대온도이다. Fig. 5(c)는 제안된 알고리즘과 MODIS

Fig. 7. Histogram of the estimation errors between the results of proposed algorithm and MODIS LST data. One thousand random samples were used for the comparison. The mean value is 0.485 K with a standard deviation of 1.552 K.

LST의 차를 나타낸다.

결과 영상에서 볼 수 있듯이 전반적으로 두 결과가 비교적 잘 일치하고 있으나 제안된 알고리즘에서 얻어진 온도 분포의 변화도가 MODIS LST 자료에 비해 좀 더 큰 것을 알 수 있다. 두 결과의 차이를 좀 더 정량적으로 분석하기 위해 영상 내 무작위로 선정된 1000개의 점에서의 값들의 상관관계를 Fig. 6과 7에 비교하였다. 비교 결과 제안된 알고리즘으로부터 측정된 값과 MODIS LST로부터 측정된 값에 대한 상관관계수 R값은 0.936으로 두 자료간의 값의 유사도가 매우 높음을 알 수 있다. 그러나 기울기가 1.192로 제안된 알고리즘은 측정하려는 타겟의 온도 차가 높아질 경우 상대온도를 과추정 할 수도 있다고 생각된다. 또한 Fig. 7에서와 같이 히스토그램 분포를 이용한 분석에서는 두 결과의 차이의 분포가 대체로 정규분포를 나타내며 $0.485 \pm 1.552 \text{ K}$ (1σ)의 평균적인 차이를 보여 상대온도추정 알고리즘이 적용 가능 함을 알 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 중적외선 단일밴드 영상의 지표 상대 온도 추정을 위한 활용 기술 개발을 위한 알고리즘을

제안 하였다. 핵심 아이디어는 동일한 대기효과를 받는다는 가정 하에서 차분된 상대적인 복사량 값은 대기효과를 상쇄한다는 것과 대부분의 자연물은 유사한 지표 복사율을 갖는다는 점이며, 이를 입증하기 위해 시뮬레이션 연구가 수행되었다. 시뮬레이션 실험 결과 복사율 0.1이내의 오차에 대하여 상대온도 추정 정밀도는 절대온도 300 K의 온도 대역에서는 2 K 이내의 상대 온도추정 정밀도를 나타냈다. 온도 대역을 넓혀서 분석한 결과 야간 영상의 경우 대부분의 온도 대역에서는 2 K이내의 정밀도를 나타내었으며, 주간 영상의 경우는 겨울철에 조건에 따라 최대 7 K이상의 오차도 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 이 결과로부터 온도가 낮은 고위도 지역이나 겨울철에 온도 추정 시 복사율의 차이가 큰 지역을 관측 할 경우에는 정밀도가 떨어진다는 점을 고려해야 함을 알 수 있었다. 제안된 알고리즘을 검증하기 위해 MODIS Band 23 영상에 시험 적용하여 검증 하였으며, 외부 입력자료 없이 영상자체만으로 MODIS LST를 기준으로 0.485 ± 1.552 K의 오차를 가지는 만족할 만한 상대온도를 계산하였다.

이 연구 결과는 외부자료를 기대할 수 없는 단일밴드 중적외선으로부터 단지 영상만을 이용해 보정이 어려운 주간 영상의 경우에도 대부분의 경우 시뮬레이션 결과로부터 2K이내의 상대온도 추정 정밀도를 기대할 수 있음을 보였다. 반면 상대적인 온도차이만을 알 수 있으므로 절대온도를 추정해야 하는 경우 영상내의 최소 한 점 이상의 기준 온도정보가 반드시 필요하다는 제약 사항이 따른다. 따라서, 절대온도를 고려하는 경우 정밀도는 기준온도의 정밀도만큼의 오차가 포함된다는 문제점이 발생한다. 또한, 중적외선 주간 영상의 특성상 고위도 지역이나 중위도 지역 겨울철과 같이 저온인 지역의 경우 지표에서 복사되는 에너지 자체가 매우 작아지므로 상대적으로 온도 추정 오차가 커질 수 있다는 점을 유의해야 할 것이다. 향후 연구에서는 이를 극복하기 위해 확보할 수 있는 외부자료에 따라 알고리즘의 정밀도를 향상시키는 방안이 연구될 것이다.

사 사

본 논문은 국방광역감시 특화연구센터 프로그램의

일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Baek, S.-G. and D.-H. Jang, 2012. Evaluating the land surface characterization of high-resolution middle-infrared data for day and night time, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 15(2): 113-125 (in Korean with English abstract).
- Becker, F. and Z.L. Li, 1990. Temperature independent spectral indices in thermal infrared bands, *Remote Sensing of Environment*, 32: 17-33.
- Boyd, D.S. and F. Petitcolin, 2004. Remote sensing of the terrestrial environment using middle infrared radiation (3.0-5.0 μm), *International Journal of Remote Sensing*, 25(17): 3343-3368.
- 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.
- Jiménez-Muñoz, 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(D22): 4688.
- Kaufman, Y.J. and L.A. Remer, 1994. Detection of forests using MID-IR reflectance: An application for aerosol studies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(3): 672-683.
- Mushkin, A., L.K. Balick, and A.R. Gillespie, 2005. Extending surface temperature and emissivity retrieval to the mid-infrared (3-5 μm) using the Multispectral Thermal Imager (MTI), *Remote Sensing of Environment*, 98: 141-151.

- Park, W., Y.-K. Lee, J.-S. Won, S.-G. Lee, and 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).
- Petitcolin, F. and E. Vermote, 2002. Land surface reflectance, emissivity and temperature from MODIS middle and thermal infrared data, *Remote Sensing of Environment*, 83: 112-134.
- 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.
- Salisbury, J.W. and D.M. D'Aria, 1994. Emissivity of terrestrial materials in the 3-5 μ m atmospheric window, *Remote Sensing of Environment*, 47: 345-361.
- 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., J.C. Jiménez-Muñoz, and L. Paolini, 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5, *Remote Sensing of Environment*, 90: 434-440.
- Valor, E. and V. Caselles, 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African and South American areas, *Remote Sensing of Environment*, 57: 167-184.
- Van de 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: 1119-1131.
- Wan, Z. and J. Dozier, 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4): 892-905.
- Wan, Z. and Z.L. Li, 1997. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4): 980-995.
- 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.