

위성센서 대리 검보정을 위한 소노란 사막의 복사 가변성 연구

김원국*† · 이상훈**

*메릴랜드대학교, 지리학과, **가천대학교, 산업공학과

Study on Radiometric Variability of the Sonoran Desert for Vicarious Calibration of Satellite Sensors

Wonkook Kim*† and Sanghoon Lee**

*Department of Geographical Sciences, University of Maryland

**Department of Industrial Engineering, Gachon University

Abstract : The Sonoran Desert, which is located in North America, has been frequently used for vicarious calibration of many optical sensors in satellites. Although the desert area has good conditions for vicarious calibration (e.g. high reflectance, little vegetation, large area, low precipitation), its adjacency to the sea and large variability in atmospheric water vapor are the disadvantages for vicarious calibration. For vicarious calibration using top-of-atmospheric (TOA) reflectance, the atmospheric variability brings about degraded precision in vicarious calibration results. In this paper, the location with the smallest radiometric variability in TOA reflectance is sought by using 12-year Landsat 5 data, and corrected the TOA reflectance for bidirectional reflectance distribution function (BRDF) which is another major source of variability in TOA reflectance. Experiments show that the mid-western part of the Sonoran Desert has the smallest variability collectively for visible and near-infrared bands, and the variability from the sun-target-sensor geometry can be reduced by the BRDF correction for the visible bands, but not sufficiently for the infrared bands.

Key Words : Sonoran Desert, vicarious calibration, TOA reflectance, Landsat 5, bidirectional reflectance distribution function (BRDF)

요약 : 북미 지역에 위치한 소노란 사막은 많은 위성 광학 센서의 대리 검보정에 이용되어왔다. 소노란 사막은 대리 검보정에 적합한 조건들, 즉 높은 반사율, 적은 식생, 비교적 넓은 면적, 적은 강우량 등을 가지고 있지만, 고도가 낮고 바다에 근접해 있어 대기의 수증기량에 계절적 변화가 크다는 단점이 있다. 대기 상층의 반사율(Top-Of-Atmosphere reflectance, TOA reflectance)만을 이용하여 센서의 감퇴(sensor degradation)를 추정하는 대리 검보정 방법의 경우, 이러한 대기 가변성은 대리 검보정의 정밀도를 떨어뜨리는 결과를 가져온다. 이 논문에서는 12년간에 걸쳐 수집된 Landsat 5 영상을 이용해 소노

접수일(2013년 3월 29일), 수정일(1차 : 2013년 4월 15일), 게재확정일(2013년 4월 18일).

† 교신저자: 김원국(wonkook@umd.edu)

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.

란 사막 지역 내에서 복사도의 가변성이 가장 작은 위치를 찾아내고, TOA 반사율 가변성의 또 다른 원인인 양방향 반사분포함수(Bidirectional reflectance distribution function, BRDF)를 규명하여 그에 대한 보정을 시도하였다. 실험의 결과, 소노란 사막의 중서부가 가시광선과 근적외선 밴드에 대해 고루 낮은 가변성을 가지는 지역임이 밝혀졌고, BRDF 모델을 통하여 태양-타겟-센서 간의 위치변화로 말미암은 가변성을 고려한 결과, 가시광선 밴드들의 경우 그 BRDF 효과가 상당히 감소하였지만, 근적외선 밴드들의 경우 대기 가변성으로 인해 BRDF 효과가 많이 제거되지 못하였음을 관찰하였다.

1. 서론

사막 지역은 안정적인 광학적 특성을 가지고 있어서 많은 위성 센서의 대리 검보정을 위한 장소로서 이용돼 왔다. 그 중에서도 미국-멕시코 국경 부근에 있는 소노란 사막(Sonoran Desert)은 북미 지역의 검보정 사이트 중에서도 우수한 광학적 안정성을 가지는 것으로 알려져 있고, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Landsat 등의 극궤도 위성이나 Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)와 같은 정지 위성의 대리 검보정에 자주 활용되어 왔다(Knapp and Haar, 2000; Smith *et al.*, 2000; Morstad and Helder, 2008; Helder *et al.*, 2008; Angal *et al.*, 2010; Uprety and Cao, 2012). 특히, 북미 대륙을 주 대상으로 하는 GOES 위성은, 대리 검보정에 흔히 사용되는 북아프리카의 사막 지역을 관찰할 수 없기 때문에, 소노란 사막이나 White Sands 등의 아메리카 대륙에 있는 극히 제한된 지역만을 이용해야 한다는 점에서, 소노란 사막에 대한 연구의 중요성이 있다.

가장 일반적인 대리 검보정의 방법은, 표면 반사율(surface reflectance) 값으로부터 산출된 TOA reflectance를 센서에서 측정된 반사율과 비교하여 센서의 오차를 계산하는 절대 검보정(absolute calibration) 방법이다(Sohn *et al.*, 2000, Kim *et al.*, 2008). 표면 반사율로부터 TOA 반사율을 계산하기 위해서는, 위성 영상이 얻어진 시점의 표면 BRDF와 대기의 수증기, 에어로졸의 양 등의 대기조건을 정확히 알아낸 후, 대기 복사 전달 모델(Radiative Transfer Model, RTM)을 이용하여야 한다. 표면 BRDF나 대기 수증기의 양, 에어로졸의 양 등 RTM에 필요한 입력값을 현장에서 위성영상이 취득될 시점에 측정하는 것이 가장 정확한 방법이지만, 인력과 시간 그리고 비

용의 제한으로 이러한 현장측정을 동반한 절대 검보정 방법을 자주 시행할 수 없다는 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하는 방법으로, 현장측정을 대신하여 위성 product나 reanalysis data 등을 이용하는 방법이 있는데, 이러한 방법은 한 시점의 정확한 검보정에는 그 정확도가 떨어지지만, 장기간의 센서 감퇴 정도를 모니터하고 그 형태를 분석하는 일에 유용하게 쓰일 수 있다. 예를 들어, 중국의 극궤도 위성인 Fengyun-3A의 센서 대리 검보정에 대한 연구(Sun *et al.*, 2012)를 보면, 현장에서 측정된 표면 BRDF대신에 MODIS의 BRDF product를, 그리고 실측 수증기, 에어로졸 양 대신에 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data를 이용하여 대리 검보정을 시행하였고, TOA 반사율의 연속적인 변화를 관찰함으로써 장기간에 걸친 센서 감퇴 모니터링에 유용하게 쓰일 수 있는 것을 볼 수 있다.

이에 한발 더 나아가, 최근에는 TOA 반사율 값만을 이용하여 센서의 감퇴 정도를 추정하는 연구들이 이루어지고 있는데, 대기의 영향이 비교적 일정하거나 규칙적인 형태를 가지고 있을 때, 그리고 센서에서 측정되는 TOA 반사율의 BRDF를 충분히 규정할 수 있을 때, 장기간의 센서 감퇴를 추정하기 위해 활용될 수 있다.

소노란 사막 지역을 이러한 직접적인 방식의 검보정을 위해 활용할 경우, 이 사막지역의 대기의 가변성과 방향성 반사특성을 면밀히 파악해야 한다. 소노란 사막은 앞서 기술된 바대로 대리 검보정으로 쓰이기에는 좋은 조건을 갖추고 있지만, 바다에 가깝고 일 년에 두 차례 주기적으로 상당량의 비가 와서 대기 수증기량의 상당한 변화가 예상된다(Kim *et al.*, 2012). 본 연구에서는 1999년부터 2010년 사이에 얻어진 12년간의 Landsat 5 Thematic Mapper (TM) 영

상을 통해서, 대기에 의한 TOA 반사율의 가변성을 관찰하고, 전반적으로 가변성이 작아서 정확한 센서감도 추정을 위해 가장 적합한 지역을 찾아내고자 한다. 또한, 다양한 태양-타겟-센서 위치에서 기인하는 BRDF 효과에 의한 변동 또한 규명이 되어야 하는데, 기존의 표면 반사율에 많이 쓰여왔던 BRDF 모델들을 TOA 반사율 시계열 자료에 적용하여, 대기 상층에서의 BRDF를 규명하고자 한다.

2. 소노란 사막(Sonoran Desert)

소노란 사막은 미국과 멕시코의 국경지대에 있는(N32.35°, W114.65°) 사막 지역으로서 평균 해수면 고도는 0.2 km이다. 밀도는 낮지만, 사막성 식물이 사막 전역에 걸쳐 고루 분포되어 있고 곳곳에 사구가 형성되어 있다. 소노란사막 지역은 대리 검보정

사이트에 적합한 높은 반사율을 가지고 있는데, Hyperion 영상을 통해 얻어진 TOA 반사율 분광곡선이 Fig. 1에, 북아프리카의 지역에서 가장 자주 쓰이는 검보정 사이트인 Libya 4(N28.55°, W23.39° 중심으로 15x15 km)의 분광곡선과 비교되어 나타내어져 있다. 비슷한 시기의 맑은 날(9/19/2010-소노란 사막, 9/15/2010-리비아 사막)에 획득된 두 분광곡선을 보면, 소노란 사막이 전반적으로 낮은 반사율을 가지고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 식생이나 토양 등의 다른 토지 피복(land cover)에 비해 높은 값이다.

소노란 사막 지역은 일 년에 두 차례의 주기적인 강우패턴을 가지고 있는데, 첫 번째 우기인 12월과 3월 사이에는 북태평양으로부터 발달한 전선성 강우(frontal storm)가 비교적 적은 양의 비를 뿌리고, 두 번째 우기인 7월과 9월 중순 사이에는 천둥을 동반한 국지성 호우가 짧은 기간에 강한 강우를 가져온다 (Woodhouse, 1997). Fig. 2는 1999년과 2008년 사이에

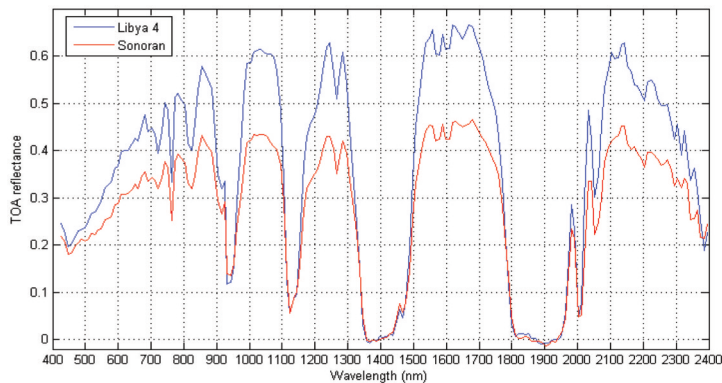


Fig. 1. TOA reflectance of the Sonoran and the Libyan Desert retrieved from Hyperion data

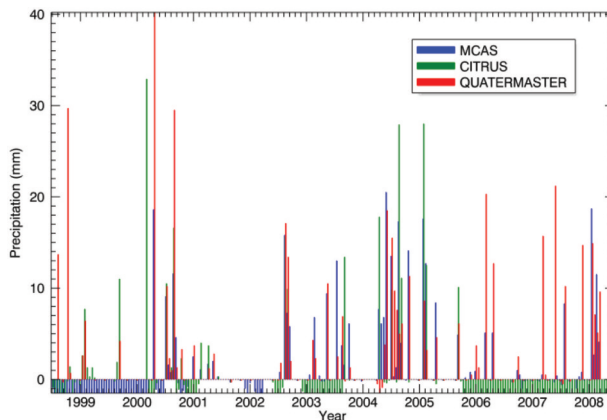


Fig.2. Precipitation distribution for the Sonoran Desert between 1999 and 2008.

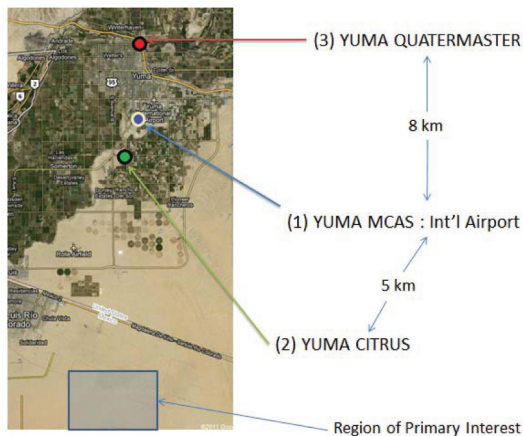


Fig. 3. Locations of GHCN stations near the Sonoran Desert used in this study

소노란 사막 근처에 있는 Global Historic Climatology Network (GHCN) 관측소에서 관측된 강우량을 표시한 그림이다. 사막 지역으로부터 30 km 반경에 있는 7개의 관측소 가운데서 1999년부터 2008년까지 비교적 지속해서 관측이 이루어진 3개의 관측소(YUMA MCAS, YUMA CITRUS, YUMA QUATERMASTER)가 선택되었고(Fig. 3), Landsat 영상의 재방문 주기(revisit period)에 맞게 16일 단위로 합산하여 강우량을 나타내었다. 강우 데이터가 없는 시기는 음수의 값으로 대체하였다. 앞서 기술된 바와 같이, 주로 매해 겨울과 늦여름에 강우가 집중되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 특히 2000년과 2001년 사이 그리고 2004

년과 2005년 사이의 겨울에는 비교적 많은 양(>60 mm)의 강우가 있었던 것을 확인할 수 있다. 반면에 2006, 2007, 2008년은 겨울철 대신에 여름철의 강우가 두드러진 것을 볼 수 있다.

3. Landsat 5 Thematic Mapper

이 연구에서는 소노란 사막 지역의 TOA 반사율의 시간적 공간적 특성을 분석하기 위하여 12년간(1999–2010)의 Landsat 5 Thematic Mapper (TM) 영상을 수집하여 그 시계열을 분석하였다. Landsat 5 TM 센서는 450–2350 nm 사이의 7개의 밴드를 가지고 있고 가시광선 영역으로부터 근적외선 영역까지의 신호를 기록할 수 있다. 이 연구에서는 열 밴드(thermal band)를 제외한 6개의 광학 밴드(optical band) 즉, 밴드 1, 2, 3, 4, 5, 7가 이용되었다. Fig. 4는 각 밴드의 분광 반응함수(spectral response function)와 Hyperion 영상으로부터 얻어진 소노란 사막 지역의 분광곡선을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 근적외선 밴드 즉, 밴드 4, 5, 7의 경우 수증기 흡수가 큰 파장대에 걸쳐 있어 다른 밴드에 비해 대기의 수증기량 변화에 의한 영향이 클 것임을 알 수 있다. TOA 반사율을 통한 특정 지역의 안정성 연구에 있어서 Landsat 5 TM이 가지는 장점은, Landsat 5 TM 영상은 onboard

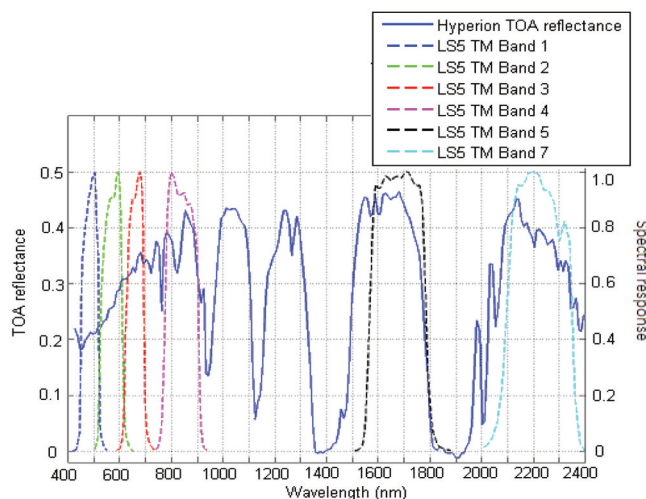


Fig. 4. TOA reflectance of the Sonoran Desert (left axis) obtained from Hyperion data compared to the relative spectral response function (right axis) of each band of Landsat 5 TM

검보정 장치와 대리 검보정 절차를 통해서 센서 감쇠 현상에 대한 보정이 잘되어있어, 장기간의 시계열을 구성할 때 센서 감쇠 현상으로 인한 추세(trend)가 생기지 않고(Helder *et al.*, 2008), 또한 Landsat 5 TM 영상은 항상 근천저점(near-nadir) 방향을 향해 영상을 획득하기 때문에, 고려해야 할 태양-타겟-센서간의 기하변수가 태양의 천정각(solar zenith angle)에 제한되어 기하학적 복잡성이 다른 극궤도 위성에 비해 덜하다는 점이다.

1) TOA 반사율의 계산

센서를 통해 얻어진 디지털 값(Digital Number; DN)은 다음 식을 통해서 분광 복사도 (spectral radiance)로 변환될 수 있다.

$$L_{\lambda} = (LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) * (Q_{cal} - Q_{calmin}) / (Q_{calmax} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

L_{λ} 는 파장대 λ 에 대한 분광복사도($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$), Q_{cal} 은 해당픽셀에서의 DN이고, Q_{calmin} 과 Q_{calmax} 는 각각 $LMIN_{\lambda}$, $LMAX_{\lambda}$ 에 해당하는 최소/최대 DN, 그리고 $LMIN_{\lambda}$ 과 $LMAX_{\lambda}$ 는 센서에서의 최소/최대 분광 복사도 값($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$)이다(Chander *et al.*, 2009). DN에 대한 분광복사도가 얻어지면, 다음 식을 통해서 TOA 반사율을 계산할 수 있다.

$$\rho_{\lambda} = (\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2) / (ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s) \quad (2)$$

ρ_{λ} 는 TOA 반사율, L_{λ} 는 센서 aperture에서의 분광복

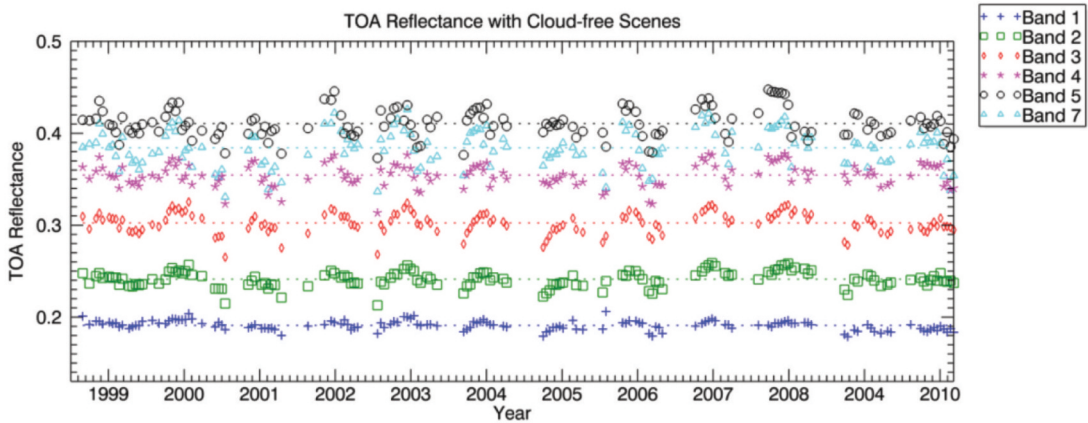
사도($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$), d 는 지구와 태양사이의 거리(천문단위; AU), $ESUN_{\lambda}$ 는 평균 외기권 태양 복사량($W/(m^2 \cdot \mu m)$), θ_s 는 태양의 천정각($^{\circ}$)이다(Chander *et al.*, 2009).

2) 시계열 계산

소노란 사막 내의 한 지점을 중심으로 일정 공간 범위 내에 있는 샘플들을 평균을 내어 시계열을 구성하였다. Landsat 테이더는 16일의 획득주기를 가지므로, 밴드별로 일 년에 최대 23개의 시계열 값이 얻어질 수 있다. 각 지점의 평균값을 계산하기에 앞서, 구름에 영향을 받은 픽셀들은 Automatic Cloud Cover Assessment (ACCA) 기법(Irish, 2000)을 통해서 제거되었다. ACCA 기법은 Landsat 영상의 구름 탐지를 위한 알고리즘으로써, 각 픽셀별로 구름에 의해 영향을 받았는지를 판별하여준다. ACCA 기법은 두 단계로 구성되어 있는데, 첫 번째 단계에서는 밴드별로 미리 계산된 threshold를 이용해서 구름일 가능성이 높은 픽셀들을 걸러내고, 두 번째 단계에서는 전 단계에서 걸러진 구름일 확률이 높은 픽셀들의 통계를 이용해 구름과 혼동되기 쉬운 픽셀들을 속아내게 된다.

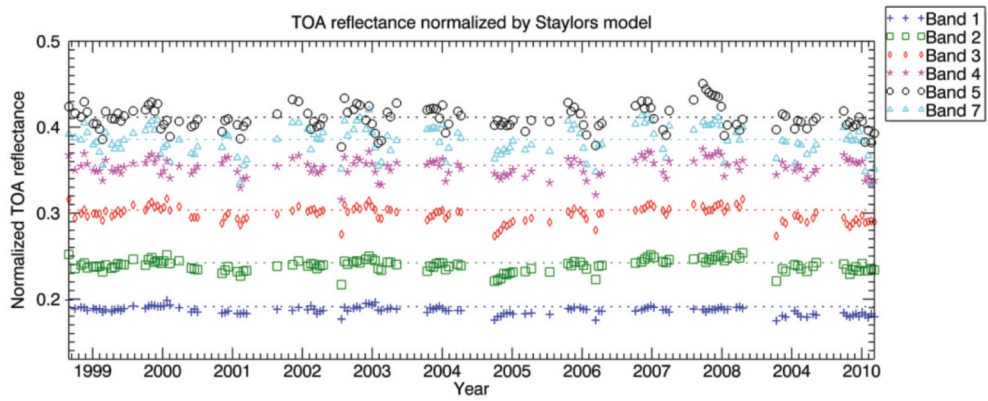
4. 소노란 사막의 가변성 분석

Fig. 5 (a)는 소노란 사막의 한 지점에서 12년간 수

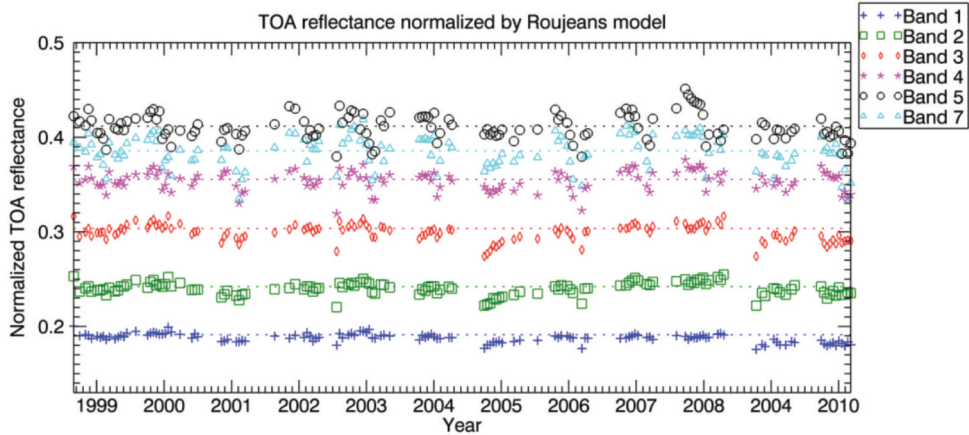


(a)

Fig. 5. (a) TOA reflectance time series of Landsat 5 TM data over the Sonoran Desert, and the normalized time series obtained by (b) Staylor's model and (c) Roujean's model.



(b)



(c)

Fig. 5. Continued

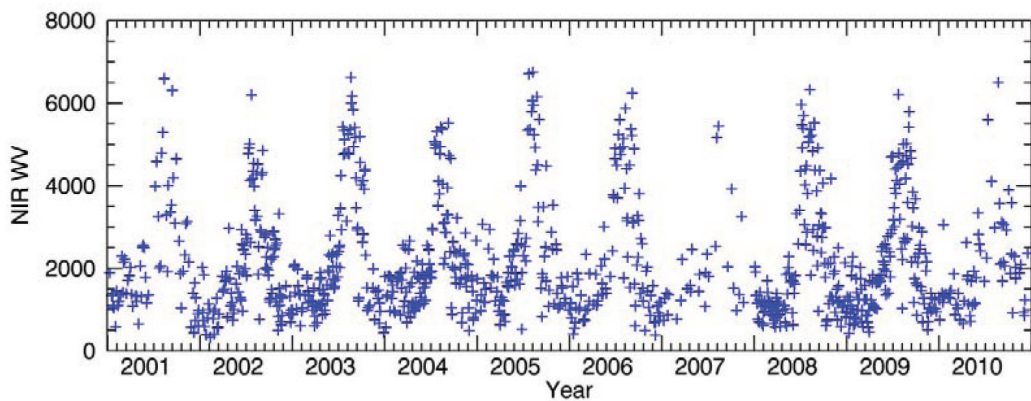


Fig. 6. Water vapor amount retrieved from MODIS NIR Water Vapor Product for the period between 2001 and 2010 (g/cm^2)

집된 Landsat 5 TM 영상으로부터 얻어진 TOA 반사율의 시계열을 보여준다. 각 밴드의 곡선들을 보면, 식 (2)에서 보듯이 태양의 복사량(solar irradiance)이

태양의 천정각(solar zenith angle)에 대해 보정이 되었음에도 TOA 반사율의 값이 여름철에 크고 겨울에는 작아지는 계절성을 관찰할 수 있다. 이 계절성의

크기는 파장대가 길어질수록 그 크기가 더욱 커짐을 볼 수 있다. 특이한 점은 늦여름시기에 TOA 반사율에 급격한 감소한다는 것이다. 감소량의 크기는 가시광선 영역의 밴드에서는 비교적 작지만, 밴드 3이나 근적외선 영역의 밴드(밴드 4, 5, 7)에서는 계절성의 크기 만큼 크게 나타난다. 대기 수증기에 의한 흡수를 그 원인으로 꼽을 수 있는데, Fig. 6에서와 같이 MODIS 영상에서 얻어진 소노란 사막 지역의 대기 중의 수증기량이 그 시기와 주기가 비슷하고 TOA 반사율이 급격히 감소하는 시점과 수증기량의 증가하는 시점이 일치하는 것으로 볼 때, 늦여름

의 근적외선 밴드에서의 급격한 반사율 감소는 대기 중 흡수에 의한 것임을 시사한다. MODIS 수증기 자료는 MODIS 05 Near-infrared (NIR) Water Vapor product를 이용하였다.

1) 최적 장소의 결정

소노란 사막은 비교적 균일한 상태의, 식생이 거의 없는 모래 지형으로 구성되어 있지만, 사막성 식생이 사막 전역에 고루 분포해 있고, 또 사구의 유무나 모양 등의 차이로 인하여 위치에 따라 다른 시간적 가변성을 나타낼 수 있다. 예를 들면, Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 사막의 서쪽 가장자리 농작지와 가까운 지역은 상당량의 식생이 분포하고 성장이 강우량에 크게 좌우되는 식생이 전지역에 분포하여 복사도의 측정에 영향을 미치게 된다. 또한, 사막 서쪽 지역에 형성되는 사구는 별모양의 사구(star dunes)인데 반해 동쪽 지역의 사구는 초승달형 사구(crescent dunes)가 많이 분포되어 있다.

보다 정밀한 대리 검보정 결과를 얻을 수 있는 지점을 찾기 위해 소노란 사막 지역 내에 10 km 간격으로 73개의 격자점을 생성하고, Landsat 5 TM을 이용해 각 지점의 시간적 가변성(temporal variability)과 공간적 동질성(spatial homogeneity)을 계산하였다. 시간적 가변성(α)은 전체 시계열의 평균값에 대한 표준편차의 비율로 나타내었고, 공간적 동질성(τ)은 일정한 공간범위 내에 있는 샘플들의 평균값에 대한 그 샘플들의 표준 편차의 비율로 나타내었다. 앞

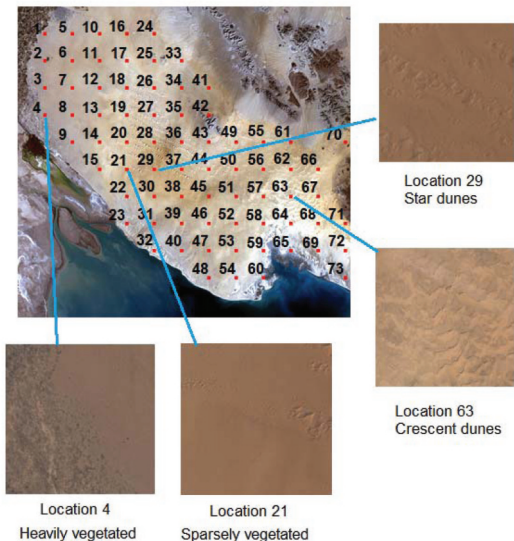


Fig. 7. Grid points generated for the variability analysis and different surface structures in 4 example sites.

Table 1. Temporal variability (α) and spatial homogeneity(τ) for the 10 grid points selected for the smallest temporal variability.

| Visible Bands (1, 2, 3) | | | | Infrared Bands (4, 5, 7) | | | | All Bands | | | |
|-------------------------|-----------|--------------|------------|--------------------------|-----------|--------------|------------|-----------|-----------|--------------|------------|
| ID | Size (km) | α (%) | τ (%) | ID | Size (km) | α (%) | τ (%) | ID | Size (km) | α (%) | τ (%) |
| 21 | 20 | 1.357 | 0.015 | 4 | 15 | 3.443 | 0.040 | 21 | 20 | 2.490 | 0.020 |
| 21 | 15 | 1.371 | 0.014 | 4 | 20 | 3.462 | 0.059 | 30 | 20 | 2.504 | 0.019 |
| 20 | 20 | 1.376 | 0.015 | 68 | 10 | 3.488 | 0.020 | 21 | 15 | 2.508 | 0.019 |
| 20 | 15 | 1.397 | 0.014 | 68 | 15 | 3.493 | 0.026 | 29 | 20 | 2.510 | 0.023 |
| 37 | 20 | 1.411 | 0.019 | 57 | 20 | 3.502 | 0.024 | 21 | 10 | 2.527 | 0.017 |
| 29 | 20 | 1.416 | 0.015 | 11 | 20 | 3.507 | 0.015 | 38 | 10 | 2.544 | 0.020 |
| 21 | 10 | 1.424 | 0.012 | 45 | 20 | 3.508 | 0.023 | 37 | 20 | 2.549 | 0.025 |
| 20 | 10 | 1.431 | 0.013 | 3 | 20 | 3.520 | 0.056 | 20 | 20 | 2.551 | 0.021 |
| 30 | 20 | 1.447 | 0.017 | 45 | 5 | 3.528 | 0.017 | 38 | 15 | 2.557 | 0.020 |
| 29 | 10 | 1.451 | 0.013 | 51 | 10 | 3.529 | 0.014 | 38 | 20 | 2.558 | 0.019 |

에서도 설명되었듯이 시계열 상의 한 시점의 데이터는 일정한 공간 범위에 있는 샘플들의 값을 평균한 값으로 대표되는데, 공간범위의 가변성에 대한 영향을 고려하기 위해 4종류의 다른 크기, 즉 5×5 km, 10×10 km, 15×15 km, 20×20 km를 가변성/동질성 계산에 사용하였다. 이러한 다양한 공간 범위는 다른 공간 해상도(spatial resolution)를 가진 위성 센서들을 고려함에 있어서 유용하다는 장점이 있다. 시간적 가변성과 공간적 동질성은 각 밴드별로 계산될 수 있지만, 패턴이 비슷한 가시광선대에 있는 밴드들(밴드 1, 2, 3)과 근적외선 영역의 밴드들(밴드 4, 5, 7)로 나누어서 계산되었고, 마지막 칼럼에는 6개의 밴드 전체를 평균한 값을 추가로 표기하였다 (Table 1).

가변성이 작은 상위 10개의 기록을 보았을 때, 주로 10×10 km 이상의 공간범위를 가지는 격자점에서 낮은 가변성이 얻어짐을 알 수 있고, 5×5 km의 공간범위를 이용한 시계열은 거의 포함되지 않은 것을 볼 수 있다. 가시광선 영역 밴드의 경우, 20, 21, 29, 30, 37 등의 중서부 지역이 전반적으로 낮은 가변성을 가지고 있고, 15×15 km 또는 20×20 km 등의 비교적 넓은 공간범위에서 낮은 가변성 값이 얻어졌다. 근적외선 밴드들은 가시광선 밴드들과는 달리 57, 68 등의 동부지역이 낮은 가변성을 나타내었다. 이는 Morstad and Helder (2008)가 도출한 결과와 거의 일치하는 결과임을 알 수 있다. 전체 밴드에 대해서는 가시광선 밴드들에 대하여 낮은 가변성을 나타내었던 21, 22, 29, 30 지역들, 그리고 부근의 37, 38 지역이 낮은 가변성을 지니는 것을 볼 수 있다. 이는 TOA 반사율만을 이용해 위성 센서의 감퇴를 추정할 때에는, 21번 지점 부근의 지역이 가시광선밴드들을 위해 최적의 지점이고, 식생에 의한 영향이 큰 4번 지역을 제외하면 근적외선 밴드들을 위해서는 68번 지역의 높은 반사율을 지닌 지역이

대리 검보정 사이트에 가장 적합한 지점임을 시사한다. 편의를 위하여 어느 한 지역의 영상만을 이용해야 한다고 한다면, 6개 밴드에 대한 평균 가변성이 가장 작은 21번 지역을 선택하는 것이 가장 효과적임을 보여준다.

2) 양방향 반사율분포함수의 결정

앞의 가변성 영향 분석을 통해 전 밴드에 걸쳐 평균적으로 가장 작은 가변성을 가지는 21번 지점 (N31.936°, W114.530°)에서 15×15 km 공간범위에서 얻어진 시계열에 대해서 BRDF의 영향을 분석하였다. 15×15 km 공간 범위와 20×20 km 공간 범위는 비슷한 가변성을 보여주지만, 20×20 km 범위는 남서쪽에 위치한 식생대에 근접하여 식생대의 확장시 영향을 받을 우려가 있기 때문에, 15×15 km의 공간 범위를 선택하였다. 이 지역의 TOA 반사율에 대한 BRDF를 결정하기 위해 두 가지 BRDF모델을 사용하였다. 사막 지역을 위해 개발되었고 사막을 이용한 항공 및 위성 영상의 대리 검보정에 많이 쓰인 Saylor 모델(Saylor and Suttles, 1986)과, 식생 및 토양을 위해 물리적 모델을 이용해 개발된 Roujean 모델(Roujean *et al.*, 1992)이 사용되었다. 두 모델 모두 각각 3개의 파라미터를 가지고 있는데, 이 실험에서는 첫 2년간의 데이터를 이용하여 밴드별로 그 파라미터를 산정하고, 그 모델을 이용하여 전체 시계열의 값을 정규화(normalization)하였다. Fig. 5 (b), (c)는 21번 지점에서 두 BRDF 모델을 이용해 정규화된 TOA 반사율 시계열의 값을 보여주고 있다. 가시광선 밴드의 경우를 보면, 원래의 TOA 반사율 시계열에서 보였던 계절성이 상당 부분 제거된 것을 관찰할 수 있다. 겨울철보다 여름철에 상당히 높은 반사율을 보였던 원래 시계열에 비해, 정규화된 시계열에서는 계절 간의 차이가 감소한 것을 볼 수 있다. 하지만 근적외선 밴드들에서는 정규화 후에도 계절성이 그다지 감소하지 않은 것을 볼 수 있는데, 이

Table 2. Ratio of standard deviation of samples in the times series to the mean of the series (%)

| TOA reflectance / Band | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TOA | 2.653 | 3.596 | 3.772 | 3.512 | 3.882 | 5.238 |
| Saylor'smodel | 2.393 | 2.902 | 2.928 | 3.043 | 3.463 | 4.517 |
| Roujean'smodel | 2.393 | 2.855 | 2.911 | 2.956 | 3.42 | 4.463 |

는 앞서 지적된 늦여름 시기의 급격한 반사율 감소에 기인한 것으로 보인다. BRDF 모델은 기본적으로 방향성 반사특성만을 고려한 것으로, 대기의 가변성에 의한 변화를 고려할 수 없으므로, 대기의 영향으로 급격한 반사율 변화가 있게 되면 모델들의 파라미터들이 올바르게 산정되지 않기 때문이다.

Table 2는 각 밴드 시계열 자료들의 표준편차 값을 평균값에 대한 백분율로 나타낸 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 가시광선 밴드의 경우 BRDF 모델을 이용한 정규화를 통해 각 밴드별로 9.8%(밴드1), 19.2%(밴드2), 22.4%(밴드3) (이상 Staylor 모델), 그리고 9.8%(밴드1), 20.6%(밴드2), 22.8%(밴드3) (이상 Roujean 모델)이 감소했지만, 근적외선 밴드의 경우는 13.3%(밴드1), 10.8%(밴드2), 13.8%(밴드3) (이상 Staylor 모델), 그리고 15.8%(밴드1), 11.9%(밴드2), 14.8%(밴드3) (이상 Roujean 모델)에 그친 것을 볼 수 있다. Fig. 5를 통해서도 관찰되고 Table 2의 가변성의 수치에서도 볼 수 있듯이, 파장대가 커질수록 가변성의 크기도 전반적으로 커지는 것을 볼 수 있다.

Staylor 모델과 Roujean 모델과 같은 empirical BRDF 모델을 통해서 소노란 사막 지역의 TOA 반사율에 대한 BRDF를 살펴본 결과, 가시광선 영역대의 경우, Staylor 모델과 Roujean 모델을 통하여 BRDF로 인한 반사율의 변동을 감소 시킬 수 있음을 볼 수 있다. 영상에서의 태양고도의 변동은 1년 주기를 띄는데, 수증기 흡수로 말미암은 일시적인 짧은 주기의 변동을 제외하고는, 1년 주기를 띄는 BRDF로부터의 변동의 폭이 줄어들었다. 반면에, 근적외선 밴드와 같은 경우, BRDF 모델을 이용하여도 그 가변성이 크게 줄지 않고, 1년 주기를 가지는 BRDF로부터의 변동이 크게 줄어들지 않았음을 확인할 수 있어, 사용된 BRDF 모델들이 효과적으로 작용하지 않았음을 볼 수 있다.

5. 결론 및 요약

이 논문에서는 위성 센서의 대리 검보정에 자주 쓰이는 북미 지역의 소노란 사막의 복사 가변성에 관한 연구를 수행하였다. 1999년부터 2010년 사이

에 얻어진 Landsat 5 TM 영상의 시계열을 구성한 후, 소노란 사막 내에 10 km 간격으로 73개의 격자점을 생성하여 각 지점마다 가변성을 산정한 결과, 사막의 중서부가 가장 가변성이 작은 지역임이 밝혀졌고, 공간범위는 5×5 km 정도의 비교적 작은 범위보다는 15×15 km, 20×20 km 등의 공간범위에서 낮은 가변성이 얻어짐을 관찰하였다. 가시광선은 남서부 지역에서, 근적외선은 남동부 지역에서 낮은 가변성이 관찰되었고, 모든 밴드를 평균적으로 보았을 때는 가시광선에 적합했던 지역인 남서부 지역이 역시 가장 작은 가변성을 나타내는 것으로 조사되었다.

두 가지 BRDF 모델, 즉 Staylor 모델과 Roujean 모델을 이용해 TOA 반사율의 BRDF에 대한 보정을 시도하였는데, 가시광선 밴드에서는 10~22%, 그리고 근적외선 밴드에서는 10~15% 정도의 가변성 감소가 일어났음을 볼 수 있었다. 늦여름에 대기수증기 흡수에 의한 것으로 추정되는 급격한 반사율 감소가 관찰되었는데, 그 크기는 가시광선 밴드에서 보다는 근적외선 밴드에서 컸고 BRDF 모델이 근적외선 밴드의 BRDF 보정에 효과적이지 못하였음을 알 수 있었다.

참고문헌

- Angal, A., X.Xiong, T. Choi, G.Chander, and A. Wu, 2010. Using the Sonoran and Libyan Desert test sites to monitor the temporal stability of reflective solar bands for Landsat 7 enhanced thematic mapper plus and Terra moderate resolution imaging spectroradiometer sensors, *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(1): 043525.
- 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.
- Helder, D.L., B.L. Markham, and K.J.Thome, 2008. Updated radiometric calibration for the Landsat-

- 5 Thematic Mapper reflective bands, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 46(10): 3309-3325.
- Irish, R.R., 2000. Landsat 7 automatic cloud cover assessment, *Proc. of Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI*, Orlando, FL, Apr. 24-26, pp. 348-355.
- Kim, J., B.J. Sohn, U.S. Jung, H.W. Cheon, E.S. Seo, G.R. Kim, and M.L. Oh, 2008. Simulation of TOA visible radiance for the ocean target and its possible use for satellite sensor calibration, *Korean Journal of Remote Sensing*, 24(6): 535-549.
- Kim, W., S. Liang, and C. Cao, 2012. On using BRDF models for assessment of radiometric stability of Sonoran Desert, *Proc. of 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Munich, Germany, Jul. 22-27, pp. 2-5.
- Knapp, K.R. and T.H.V. Haar, 2000. Calibration of the eighth geostationary observational environmental satellite (GOES-8) Imager visible sensor, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(12): 1639-1644.
- Morstad, D.L. and D.L. Helder, 2008. Use of pseudo-invariant sites for long-term sensor calibration, *Proc. of 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Boston, MA, Jul. 6-7, pp. I-253-I-256.
- Roujean, J.L., M. Leroy, and P. -Y. Deschamps, 1992. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data, *Journal of Geophysical Research*, 97(D18): 20,455-20,468.
- Smith, D.L., C.T. Mutlow, and R.C.R. Nagaraja, 2002. Calibration monitoring of the visible and near-infrared channels of the along-track scanning radiometer-2 by use of stable terrestrial sites, *Applied optics*, 41(3): 515-523.
- Sohn, B.-J., S.-J. Yoo, Y.-S. Kim, and D.-H. Kim, 2000. Examining a vicarious calibration method for the TOA radiance initialization of KOMPSAT OSMI, *Korean Journal of Remote Sensing*, 16(4): 305-313.
- Staylor, W.F., and J.T. Suttles, 1986. Reflection and emission models for deserts derived from Nimbus-7 ERB scanner measurements, *Journal of Applied Meteorology*, 25(2): 196-202.
- Sun, L., X. Hu, M. Guo, and N. Xu, 2012. Multisite calibration tracking for FY-3A MERIS solar bands, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12): 4929-4942.
- Uprety, S. and C. Cao, 2012. Radiometric and spectral characterization and comparison of the Antarctic Dome C and Sonoran Desert sites for the calibration and validation of visible and near-infrared radiometers, *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1): 063541.
- Woodhouse, C.A., 1997. Winter climate and atmospheric circulation patterns in the Sonoran desert region, USA, *International Journal of Climatology*, 17(8): 859-873.