

지상 초분광카메라 영상의 복사보정

신정일 · Yasser Maghsoudi · 김선화 · 강성진 · 이규성[†]

인하대학교 지리정보공학과

Vicarious Radiometric Calibration of the Ground-based Hyperspectral Camera Image

Jung-II Shin, Yasser Maghsoudi, Sun-Hwa Kim, Sung-Jin Kang, and Kyu-Sung Lee[†]

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

Abstract : Although hyperspectral sensing data have shown great potential to derive various surface information that is not usually available from conventional multispectral image, the acquisition of proper hyperspectral image data are often limited. To use ground-based hyperspectral camera image for remote sensing studies, radiometric calibration should be prerequisite. The objective of this study is to develop radiometric calibration procedure to convert image digital number (DN) value to surface reflectance for the 120 bands ground-based hyperspectral camera. Hyperspectral image and spectral measurements were simultaneously obtained from the experimental target that includes 22 different surface materials of diverse spectral characteristics at wavelength range between 400 to 900 nm. Calibration coefficients to convert image DN value to at-sensor radiance were initially derived from the regression equations between the sample image and spectral measurements using ASD spectroradiometer. Assuming that there is no atmospheric effects when the image acquisition and spectral measurements were made at very close distance in ground, we were also able to derive calibration coefficients that directly transform DN value to surface reflectance. However, these coefficients for deriving reflectance values should not be applied when the camera is used for aerial image that contains significant effect from atmosphere and further atmospheric correction procedure is required in such case.

Key Words : Hyperspectral sensing, ground hyperspectral camera, radiometric calibration.

요약 : 초분광영상의 활용 가능성은 증대하고 있으나, 연구에 필요한 초분광센서의 공급은 비교적 제한되어 있다. 초분광영상으로부터 정보 획득을 위한 처리와 분석은 대부분 영상에서 획득되는 분광반사율에 기반을 두고 있다. 본 연구의 목표는 사전 복사보정 자료가 없는 지상 초분광카메라 영상의 복사보정 과정을 개발하여 영상의 화소값을 분광반사율로 변환하고자 한다. 다양한 분광반사특성을 가진 22개 클래스로 구성된 모의지표물을 대상으로 분광측정기를 이용한 대리 복사보정 절차를 수행하였다. 분광측정기로 측정된 복사량과 영상의 화소값의 관계를 이용하여 120개 밴드 초분광영상의 화소값을 센서감지 복사량(radiance)로 변환하는 보정계수를 도출하였다. 영상 촬영 및 분광측정이 대기의 영향이 거의 없는 지상 근접 촬영으로 이루어졌기 때문에, 화소값을 반사율(reflectance)로 직접 변환하는 보정계수도 산출하였다. 그러나 원거리 촬영이나 공중 촬영으로 획득된 영상의 경우 산출된 복사보정 계수는 센서감지 복사량 변환에만 유효하며, 반사율을 얻기 위해서는 추가적인 대기보정 절차가 별도로 수행되어야 한다.

1. 서론

초분광영상은 수 백 개 이상의 연속된 밴드로 구성된 분광해상도가 매우 높은 영상으로 지표물의 완전한 분광특성을 획득할 수 있는 장점을 가지고 있어 기존의 다중분광영상에 비해 지표물에 대한 보다 정량적인 분석을 가능하게 하는 원격탐사 자료이다(Goetz, 1991). 최근 초분광영상의 수요가 증가하고 있으며 지도제작 목적 이외에도 농업, 의학, 군사 목적에 있어 기존 다중분광영상으로 감지가 어려운 사물의 특성을 탐지하는 데 사용되고 있다. 지상용 초분광카메라의 경우 군사적 목적의 위장체 탐지나 농업 분야에서 작물의 상태나 작물의 종류를 구분하는데 있어 그 활용성이 인정되어 그 수요가 증가하고 있다(Surface Optics, 2001; Fitzgerald, 2004).

초분광영상을 포함하는 광학영상의 복사보정은 영상의 안정된 품질을 보증 또는 유지하거나 다양한 시기 및 센서로부터 획득된 자료로부터 정량적인 신호 특성을 추출하기 위해서 반드시 필요한 과정이다(Teillet 등, 2001). 복사보정은 절대복사보정과 상대복사보정으로 나눌 수 있는데 상대 복사보정은 다수의 감지기(detector) 배열에서 감지기 간의 민감도를 조율하거나, 다중시기 영상 간의 복사량 차이를 정규화 하는 것이다(Dingirard와 Slater, 1999; Jensen, 2005). 절대복사보정은 영상에 기록된 화소값(DN value)을 센서에 도달한 물리적인 복사에너지의 양으로 변환하는 계수를 추정하는 과정으로 사전복사보정(pre-launch calibration)과 사후복사보정(post-launch calibration)으로 나뉜다.

절대복사보정에서 화소값을 복사에너지량(radiance)로 변환하기 위한 계수(absolute calibration coefficients)는 대부분 사전복사보정에서 결정되며, 사후복사보정은 센서에 탑재된 보정장치를 이용하거나 지상에서의 분광측정값을 이용하는 대리보정(vicarious calibration) 방법을 이용한 영상의 품질 유지관리를 말한다(Dingirard and Slater, 1999). 위성영상이나 항공영상의 대리보정 절차는 균질한 지표물(사막, 수면 등)을 대상으로 영상촬영 시점에 지상에서 반사율(reflectance)을 측정한 후, 복사전달모델을 이용하여 위성/항공기 탑재 센서에 감지될 복사량을 추정된 후 영상의 화소값과 비교하는 방법이다. 위성 센서의 경우 감

지기 및 센서의 성능 저하에 따라 복사보정 변환계수를 주기적으로 갱신하기 위하여 지속적인 대리보정 절차를 수행하고 있다(Secker 등, 2001). 대부분의 광학위성 센서는 사전복사보정이 이루어지지만, CBERS-2 (China-Brazil Environmental Remote Sensing Satellite)위성의 IRMSS(Infrared Multispectral Scanner) 자료의 경우 대리보정 방법을 응용하여 복사보정 변환계수를 추정된 사례도 있다(Ponzoni 등, 2006).

다중분광영상과 달리 초분광영상에서 얻을 수 있는 가장 중요한 정보는 각 화소에 해당하는 지표물의 분광반사율(spectral reflectance)이라 할 수 있다. 따라서 초분광영상의 처리기법은 각 화소의 반사율에 기반을 둔 분광분석이 주를 이루고 있다. 즉 초분광영상에서 얻어지는 각 화소단위의 분광반사특성을 이용하여 각 화소에 해당하는 지표물의 분류, 인식, 탐지를 위한 방법의 하나로 이미 우리가 알고 있는 다양한 지표물의 분광반사특성을 비교하는 방법을 생각할 수 있다. 분광특성정합(spectral matching)은 기존에 측정된 다양한 물체의 분광반사율과 초분광영상에서 얻어지는 반사율과의 분광적 유사성을 분석하여, 초분광영상의 각 화소에 해당하는 물체의 종류 및 특성 등을 정의하는 방법이다. 따라서 초분광영상으로부터 각 지표물의 정확한 분광반사 특성을 밝히기 위해서는 무엇보다 먼저 영상의 화소값을 순수한 반사율로 변환하는 복사보정 절차가 우선되어야 한다.

초분광카메라의 대부분은 정성적인 영상판독을 위해 개발되었기 때문에, 화소값으로부터 분광반사값을 추출하는 사전 복사보정절차가 개발되어 있지 않은 경우가 대부분이다. 본 연구는 사전 복사보정 자료가 없는 지상 초분광카메라(SOC 700) 영상의 화소값으로부터 반사율을 획득하는 대리보정 절차를 개발하고자 한다. 이는 현지 분광측정값을 이용하여 상대적 대리보정 방법을 통하여 반사율을 도출하는 방법과 비슷한 과정으로서(Biggar 등, 2003), 동일한 목표물을 대상으로 영상의 화소값과 현지측정 된 복사량 및 반사율과의 관계를 나타내는 복사보정 변환계수를 추정하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에 사용된 초분광카메라(SOC700-VS)는 소형

Table 1. Specifications of SOC700-VS ground-based hyperspectral camera

Wavelength range	400-900nm
Frame size	640 by 640
Spectral resolution	4nm
Radiometric resolution	12bit
Number of bands	120
Lens	70mm
FOV	10°
IFOV	0.015625°

휴대용으로 개발된 기기로서 산업용 영상, 특정 식물 검출 및 목표물 인식을 위하여 개발되었다(http://www.surfaceoptics.com). 이 카메라는 400~900nm의 파장영역을 120개 밴드로 나누어 촬영하며, 640×640개의 2차원 면배열의 디텍터로 영상을 촬영한다(Table 1). 영상의 화소값은 12bit의 범위로 기록되지만 절대 복사량에 따른 센서의 민감도 등에 관련된 사전 보정 자료가 없으며, 실제 촬영시 광조건에 매우 민감하게 반응한다. 이러한 지상 초분광카메라의 복사보정은 결국 동일한 목표물을 대상으로 초분광영상의 화소값과 분광측정값의 관계를 이용한 상대적 보정 절차를 따라 수행될 수밖에 없다. 현재 지상 초분광카메라의 광학적 민감도와 센서 반응시간이 항공탑재에는 부적합하므로, 근거리 목표물을 대상으로 촬영한 영상을 사용하였고 따라서 대기에 의한 흡수 및 산란 효과는 고려하지 않았다.

1) 모의 지표물 제작 및 초분광영상 촬영

광학영상의 복사보정 과정에서 중요한 조건 중의 하나는 영상 내에서 센서의 해상공간(IFOV) 범위에서 동질성(homogeneity)을 갖춘 일정 면적의 지표물의 확보하는 것이다. 또한 복사량에 따른 센서의 반응도를 분석하기 위해서는 반사율이 다른 여러 종류의 기준 지표물이 있어야 한다. 자연 상태에서는 동질성을 갖춘 여러 종류의 기준 지표물을 확보하기가 쉽지 않기 때문에, 실제 항공영상이나 위성영상의 대리복사보정에서는 동질성을 구비한 여러 종류의 특수 제작된 천(tarp)을 기준 지표물로 사용하는 경우가 많다.

본 연구에서는 동질성을 갖춘 여러 지표물을 대신하여 Fig. 1과 같이 40cm×40cm 크기의 모의 지표물을 제작하였다. 모의 지표물은 다양한 분광반사 특성을 가

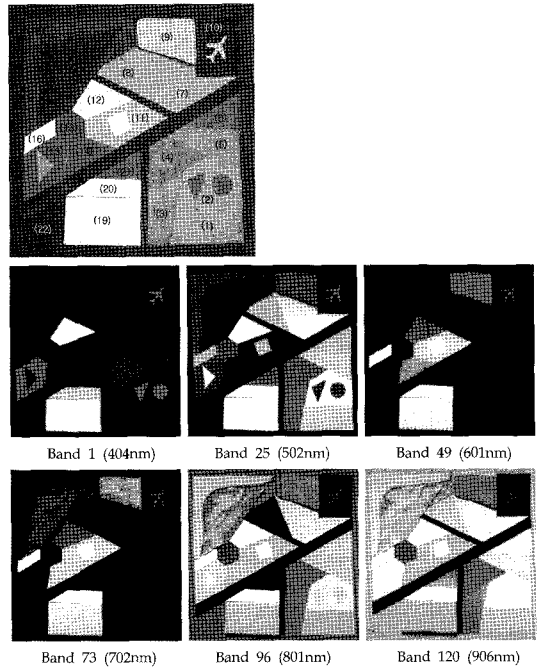


Fig. 1. Sample target images (640×640×120bands with 22 classes) from SOC700 hyperspectral camera.

지고 있는 색종이, 흙, 형짚, 목재, 플라스틱 등 22가지 재료로 제작되었으며, 음영효과를 없애기 위하여 평판에 밀착시켰다(Table 2). 모의 지표물에 사용된 재료는 실제 지표물을 대신할 수 있는 것으로 여러 가지 색종이의 경우 각 파장에서 다양한 분광반사 특성을 나타내고 있으며 특히 녹색 색종이의 경우 동일 파장에서 미세한 분광반사 특성의 차이를 보여주고 있다.

이 모의 지표물을 SOC700 초분광카메라로 지상 2m

Table 2. Materials used to make the 22-classes sample target

Class number	Material
1~6	Similar green colored paper from same producer
7~8, (2)	Green colored paper from different producer
9	Clay(dry soil)
10	Sand paper(black)
11~16	Various colored paper from same producer
17	Broad green leaf
18	Fabric(green)
19	Gypsum
20	Wood board
21	Plastic(green)
22	Black colored paper

높이에서 연직으로 촬영하였으며 주변 지형지물의 간섭이 배제된 실외 옥상에서 비교적 맑은 날 정오에 촬영하였다. Fig. 1은 모의 지표물을 촬영한 640×640 크기의 초분광영상으로서, 각 밴드가 약 4nm의 파장폭으로 촬영된 120개 밴드 영상에서 추출된 6개 밴드의 표본영상이다. 파장에 따라 지표물의 화소값이 다르게 나타나고 있으며, 특히 근적외선 파장대에 해당하는 영상에서 클래스별 밝기값의 차이가 두드러지게 나타나고 있다.

2) 모의지표물에 대한 분광반사측정

SOC700 카메라에 의한 초분광영상 촬영과 동시에

모의 지표물 내에 포함된 22개 모든 지표물에 대하여 ASD사의 FieldSpec3 spectroradiometer (350~2500nm)를 사용하여 복사량(radiance)과 반사율(reflectance)을 측정하였다. 측정조건은 10°의 시야각(field-of-view, FOV)를 갖는 fiber optic을 사용하여 지표물로부터 5cm 높이에서 연직으로 각 클래스의 중심부를 측정하였으며, 반사율을 측정하기 위해서는 황산바륨(BaSO₄)으로 코팅된 흰판을 기준면으로 이용하였다. Fig. 2는 모의지표물에 포함된 20개 클래스에서 반사된 분광복사량(radiance)을 보여주고 있다.

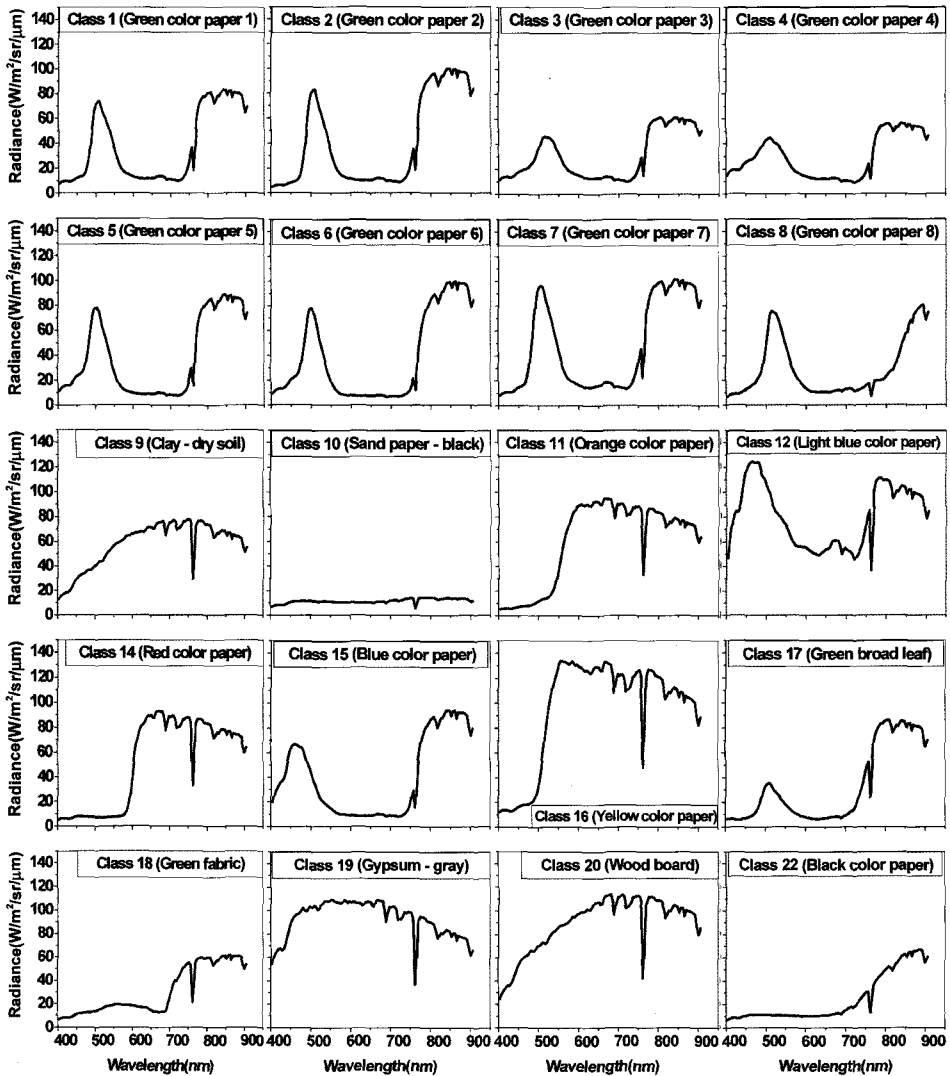


Fig. 2. Reflected radiance(W/m²/sr/μm) of 20 classes in the sample target measured by spectroradiometer.

3) 초분광카메라 영상의 복사보정계수 산출

SOC700 초분광카메라를 이용하여 촬영된 120밴드의 초분광영상에서 각 클래스별로 분광측정된 동일 지점에 대하여 324개의 화소를 추출하였다. 324개 화소는 5cm 높이에서 측정된 ASD 분광측정기의 10° 시야각(FOV)에 해당하는 면적에 포함된 화소수이며, 각 클래스가 동질의 물체이므로 최소의 변이를 갖고 있다. 모의 지표물에 포함된 22개 클래스별로 화소의 평균값과 ASD분광기로 측정된 복사에너지량을 이용하여 120개 분광밴드별로 화소값(DN)을 절대복사량(L)로 변환하는 1차 선형 회귀식을 산출하였다.

$$L_i = C_{1i} DN_i + C_{2i} \quad (1)$$

여기서 L_i 는 ASD 분광측정기로 측정된 밴드 i 의 복사

량($W/m^2/sr/\mu m$)이고, C_{1i} 는 각 밴드의 gain coefficient, C_{2i} 는 각 밴드의 offset coefficient, 그리고 DN_i 는 SOC700카메라로 촬영된 초분광영상의 i 밴드의 평균화소값을 의미한다. 각 밴드별 선형회귀식을 통하여 초분광영상 120개 모든 밴드에 대한 복사보정 변환계수(calibration coefficients)를 도출하였다. SOC700 초분광카메라는 각 밴드가 4nm의 분광해상도를 가지고 있으나, ASD 분광측정기는 1nm의 폭으로 반사에너지를 측정한다. SOC700초분광카메라의 밴드별 분광감지율(spectral responsivity)이 정확하게 알려져 있지 않기 때문에 초분광카메라 각 밴드의 중심파장에 해당하는 파장의 복사량(radiance) 값을 사용하였다. Fig. 3은 120개 밴드 중 6개 밴드에서 22개 클래스의 복사량과 영상에서 추출된 평균화소값을 보여주고 있다.

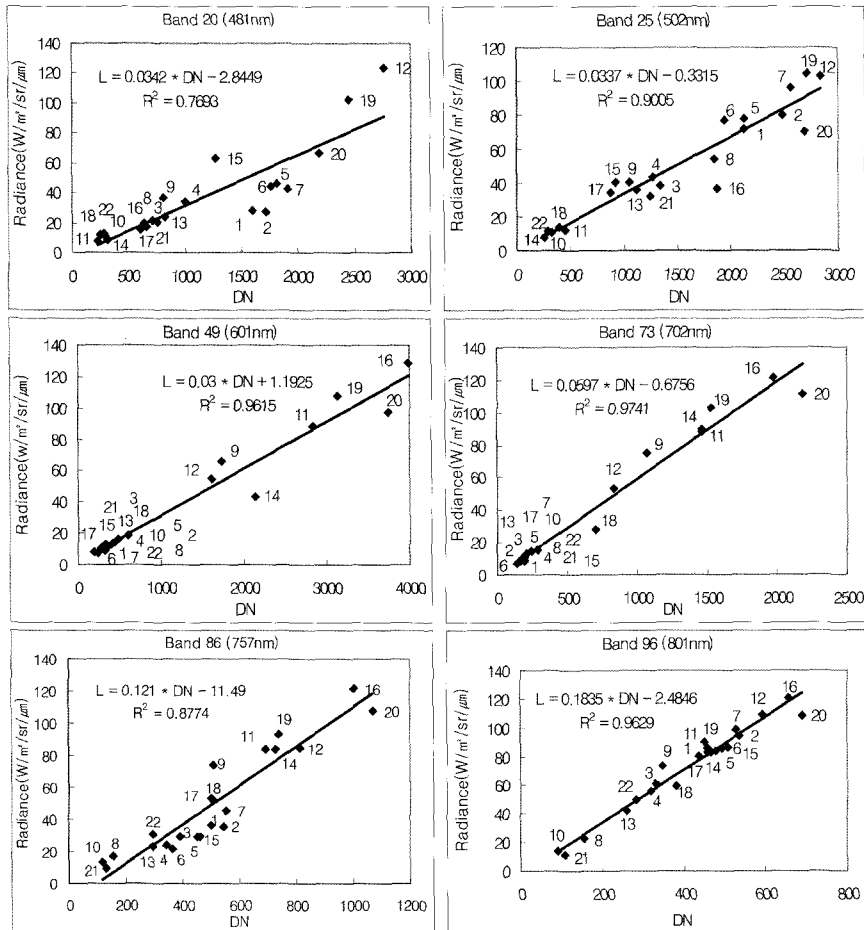


Fig. 3. Regression equations to derive calibration coefficients to convert DN to radiance with 22 classes data (6 bands among 120 bands).

초분광영상에서 지표물의 특성을 분석하기 위해서는 대부분 분광복사량에서 대기의 영향이 제거된 지표물의 분광반사율을 이용한다. 본 연구에서 사용된 지상 초분광카메라 영상의 경우 지상에서 근접 촬영되었기 때문에 대기의 영향이 거의 없다고 가정한다면, 영상의 화소값을 직접 반사율로 변환이 가능하리라 판단되었다. 위의 복사량 대비 관계식과 마찬가지로 반사율과의 관계식을 도출하였다. 즉, 22개 클래스에 대하여 영상에서 도출된 평균 화소값과 분광반사율(ρ)과의 선형회귀식을 통하여 각 밴드별 변환계수(Q_{1i} , Q_{2i})를 추정하였다.

$$\rho = Q_{1i} \times DN_i + Q_{2i} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

SOC700 초분광카메라 영상의 화소값(DN)을 복사량(radiance)으로 변환하기 위한 복사보정계수의 적합도는 각 밴드별로 도출된 선형회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수(R^2)로 가늠할 수 있다. 아래 Fig. 4에서와 같이 초분광영상의 120개 밴드 대부분이 결정계수가 0.9 이상으로 복사보정계수의 적합도가 매우 높게 나타나고 있다. 복사량과의 관계식뿐만 아니라 초분광영상의 화소값을 직접 분광반사율로 변환하기 위한 관계식 역시 높은 결정계수를 보여주고 있다. 500nm 부근과 750nm 부근에서 R^2 값이 0.75부터 0.9 사이의 값으로 비교적 낮게 나타나는 구간이 있다. 이는 22개 클래스 중 상당수를 차지하고 있는 녹색 계통의 색종이와 인공

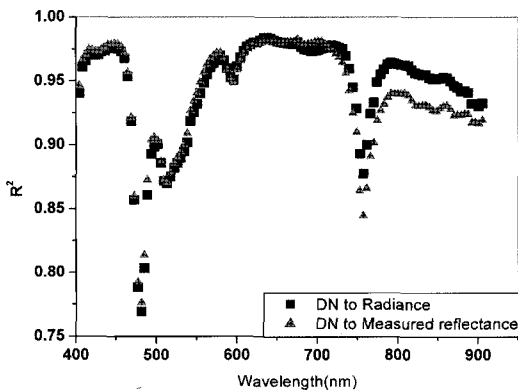


Fig. 4. R^2 values of each of 120 regression equations to derive calibration coefficients.

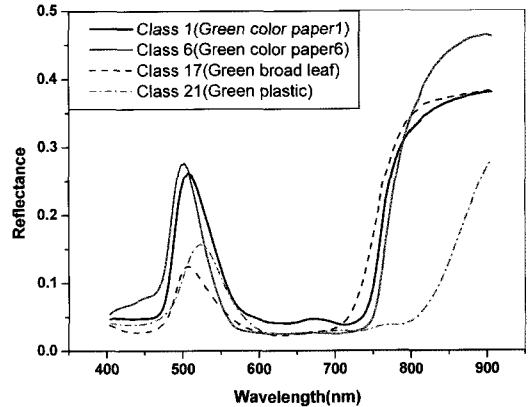


Fig. 5. Spectral reflectance curves of green materials.

물 그리고 활엽수 잎이 Fig. 5와 같이 녹색 파장영역인 500nm 부근과 red edge인 750nm 부근에서 급격한 반사율의 변화를 나타내기 때문에 센서별 디텍터의 특성이 다른 것에 기인한다고 할 수 있으며, 또한 750nm는 대기흡수 밴드에 속하기 때문에 근접 촬영이라도 반사복사량에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다. Fig. 3에서 가장 결정계수가 비교적 낮게 나타난 20번 밴드(481nm)의 그래프를 보면 녹색 색종이인 1, 2, 5, 6, 7번 클래스와 450~500nm 구간에서 급격한 반사율의 변화를 보이는 청색 색종이가 회귀식에서 벗어나 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 평균 화소값을 직접 반사율로 변환한 결과와 ASD 분광기로 측정된 반사율과의 차이를 보여주고 있다. 22개의 클래스에서 녹색계통이 아닌 지표물들에서 두 그래프간의 차이가 두드러지는 것을 볼 수 있다. 이는 선형회귀식을 이용한 변환계수 추정시 모의 지표물의 대부분을 구성하고 있는 녹색 계통의 클래스에 의한 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 초분광영상의 촬영이나 분광기에 의한 분광반사측정이 대기의 영향이 거의 없는 지상에서 근접하여 이루어졌기 때문에, 영상의 화소값을 직접 반사율로 변환하는 복사보정계수의 산출이 가능하였다. Fig. 7은 모의지표물에 포함된 4개 클래스에 대하여 측정된 400~900nm 파장구간의 복사량과 반사율의 관계를 보여주고 있다. 복사량과 반사율의 상관관계가 매우 높게 나타나는 이유는 지상에서 근접 촬영되었기 때문에 실제 대기의 영향이 매우 미미하기 때문이라 판단된다. 복사량(L)과 반사율(ρ)의 관계는 아래 수식 (3)으로

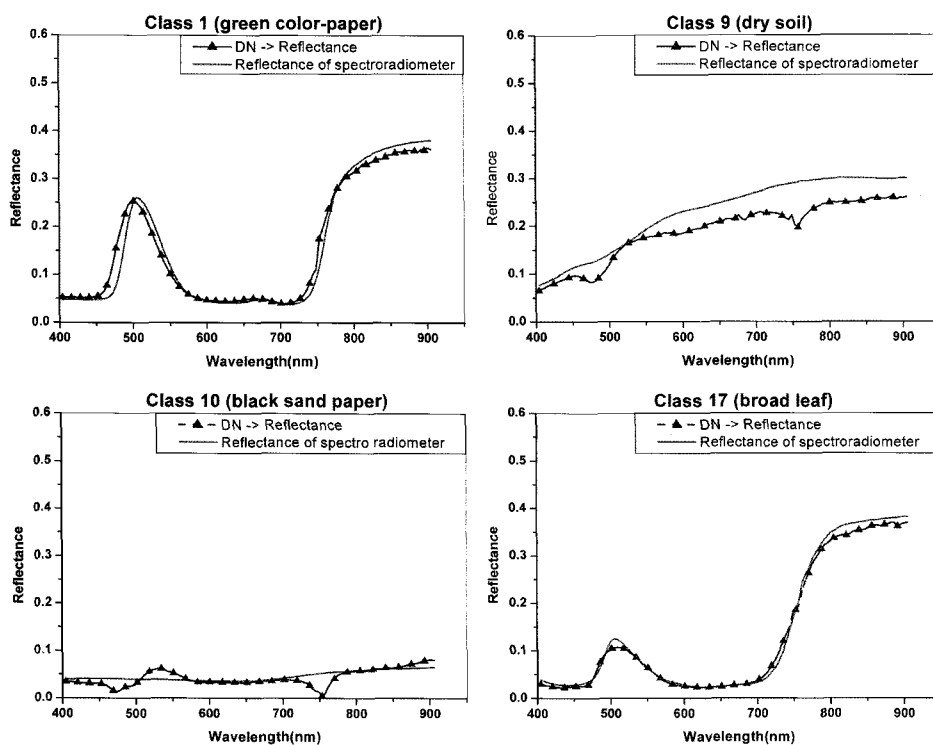


Fig. 6. Comparison between spectral reflectance curves obtained from the calibration coefficients and spectroradiometer measurement.

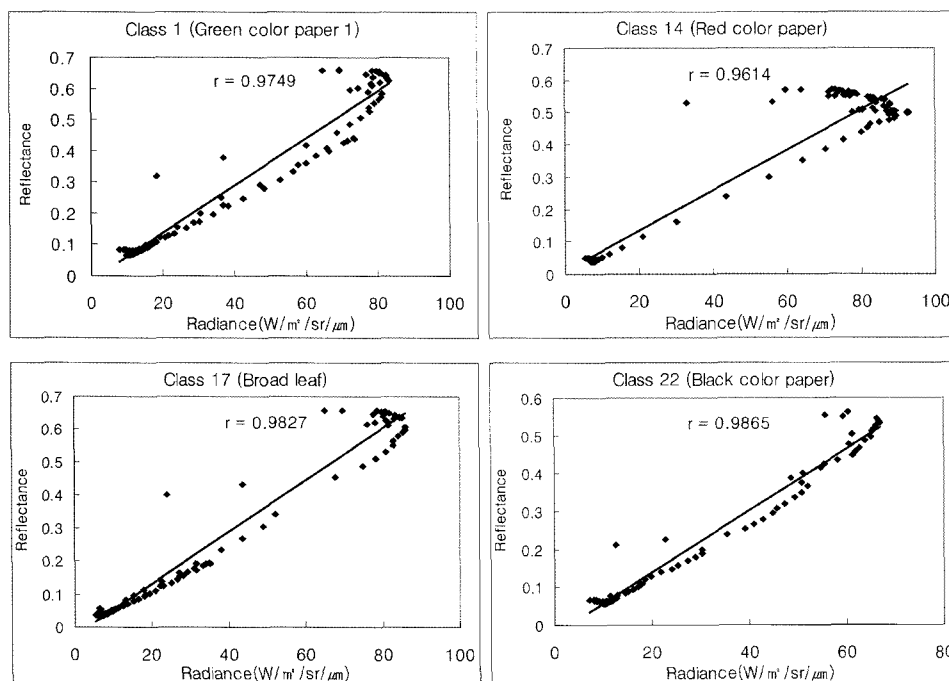


Fig. 7. Relationship between radiance and reflectance measurements with spectroradiometer for four classes from the sample target.

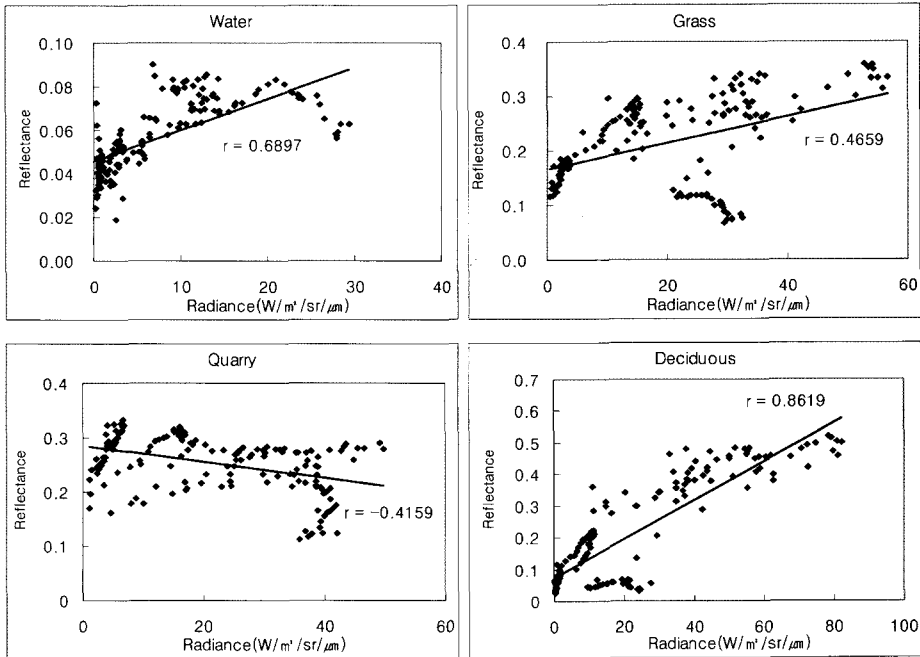


Fig. 8. Relationship between radiance and reflectance value obtained from satellite hyperspectral data (Hyperion) over different cover types (Lee *et al.*, 1997).

간략하게 표시할 수 있는데, 대기의 영향이 미미하다면 수식에서 대기영향을 나타내는 L_p 는 거의 무시할 수 있으며 대기투과율(τ)는 1에 가깝게 된다. 그러므로 반사율(ρ)은 지표물에 입사된 복사조도(irradiance) E 에 의한 영향만 받게 되므로, 센서에 감지된 복사량 L 과 상당한 선형관계를 갖게 된다.

$$L(\lambda) = L_p(\lambda) + \tau(\lambda)\rho(\lambda)E_g(\lambda)/\pi \quad (3)$$

- $L(\lambda)$: Sensor-received radiance for each channel λ
- $L_p(\lambda)$: Path radiance
- $\tau(\lambda)$: Atmospheric transmittance
- $\rho(\lambda)$: Surface reflectance
- $E_g(\lambda)$: radiation flux on the ground

그러나 초분광영상이 공중에서 촬영되었을 경우, 본 연구와 같이 영상의 화소값을 직접 반사율로 변환하기 위한 보정계수의 산출은 무리라 판단된다. Fig. 6에서 보듯이 초분광영상의 화소값을 복사량과 반사율로 변환하는 두 가지 방법이 모두 높은 적합도를 보여주는 이유는 지상 근접촬영으로 대기의 영향이 거의 없다는 가정을 증명하고 있지만, 만약 지상에서 원거리 촬영을 실시하거나 항공기나 위성에서 촬영한 초분광영상에는 대기 효과로 인하여 화소값을 직접 반사율로 변환하기 어렵

다. 이는 위의 식 (3)에와 같이 대기영향이 곱해지고 (multiplicative) 더해지는(additive) 복잡한 과정이 동시에 발생하기 때문에 본 연구에서 얻어진 결과와 같이 화소값과 반사율 사이에 선형적인 관계가 성립되지 않는다. Kim 등(2006)에 의하여 자세히 설명되었듯이 초분광영상의 대기보정은 매우 복잡한 과정을 통하여 대기에 의한 산란, 흡수 과정을 수식으로 표현하여 영상에 기록된 복사량에서 대기효과를 제거하고 파장별 복사조도로 나누어야 지표반사율을 산출될 수 있다. Fig. 8은 Lee 등(2007) 연구에 사용되었던 충청남도 홍성 지역의 여러 지표물에 대하여 EO-1 위성의 Hyperion 초분광영상 센서에서 얻어진 복사량과 대기보정절차를 통하여 구해진 반사율과의 관계를 보여주고 있다. Fig. 7과 달리 위성 초분광영상에서 얻어진 복사량과 반사율은 대부분 관계가 매우 미약한 것으로 나타나고 있다. 이는 센서에 기록된 복사량에 대기의 영향이 매우 크게 작용했음을 보여주는 것이며, 따라서 공중에서 촬영된 광학영상의 경우 화소값으로부터 직접적인 분광반사율로 변환이 매우 어렵다는 것을 의미한다.

4. 결론

초분광영상의 잠재적 활용 가능성이 매우 높게 기대되고 있으며, 그에 따라 초분광영상처리 및 활용에 관련된 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그러나 초분광영상영상이 선진국 중심으로 소수의 항공기 및 위성탑재 실험센서에 의존하여 획득되고 있는 실정으므로, 지상정보가 확인된 양질의 초분광영상을 이용한 연구 기반이 매우 취약한 현실이다. 특히 초분광영상에서 지표물과 관련된 정보 획득의 대부분은 초분광영상에서 추출되는 분광반사율에 의존하여 처리되고 있는 점을 감안한다면, 양질의 초분광영상의 확보가 우선적으로 이루어져야 한다.

본 연구는 지상 초분광카메라 영상을 이용하여 양질의 초분광영상을 획득하기 위한 기반을 마련하기 위하여 수행되었다. 즉 사전 복사보정 자료가 없는 지상카메라에서 촬영된 초분광영상의 화소값을 센서에서 수신된 복사량으로 변환하기 위한 방법으로 분광측정기를 측정을 이용한 대리 복사보정 과정을 제시하였다. 다양한 반사율을 가진 지표물을 가정하여 제작된 모의지표물을 지상 초분광카메라와 분광측정기로 촬영하여 영상의 화소값을 복사량과 반사율로 변환하는 보정계수를 도출하였다. 모의지표물에 대한 지상 근접촬영으로 대기의 영향이 거의 나타나지 않기 때문에 영상의 화소값을 직접 반사율로 변환하는 데 큰 무리가 없었으나, 원거리 지상 촬영이나 공중에서 촬영한 영상의 경우 대기의 영향 때문에 화소값과 반사율 간에 선형관계가 성립되지 않는다. 그러나 본 연구에서 도출된 복사보정계수를 통하여 화소값을 먼저 센서 감지 복사량으로 변환한 후, 이를 토대로 일반적인 대기보정 절차를 통하여 복사량을 지표반사율로 변환하는 과정이 수반될 수 있다. 향후 연구에서는 원거리 영상을 대상으로 영상 획득과 동시에 반사량을 측정하여 본 연구에서 추정된 복사보정방법을 검증하고, 더 나아가 대기효과를 감안한 복사보정방법을 개발하고자 한다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원 영상정보특화센터를

통한 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김선화, 이규성, 마정림, 국민정. 2005. 초분광 원격탐사의 특성, 처리기법 및 활용 현황, 대한원격탐사학회지, 21(4): 341-369.
- Biggar, S. F., K. J. Thome., and W. Wisniewski, 2003. Vicarious radiometric calibration of EO 1 sensors by reference to high reflectance ground targets, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1174-1179.
- Dinguirard, M. and Slater P. N., 1999. Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review, *Remote Sensing of Environment*, 68(3): 194-205.
- Fitzgerald, G. J., 2004. Portable hyperspectral tunable imaging system (PHYTIS) for precision agriculture, *Agronomy Journal*, 96(1): 311-315.
- Goetz, A. F. H., 1991. Imaging spectrometry for studying Earth, Air, Fire and Water. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 1, 3-15.
- Jensen, J. R., 2005. *Introductory digital image processing - A remote sensing perspective*, 3rd edition, Prentice hall, 213-215.
- Kim, S.-H. S.-J. Kang, J.-H. Chi, and K.-S. Lee, 2007년 2월. Absolute atmospheric correction procedure for the EO-1 Hyperion data using MODTRAN code, *Korean Journal of Remote Sensing*, 23(1): 7-14.
- Lee, K.-S., M.-J. Kook, J.-I. Shin, S.-H. Kim, and T.-G. Kim, Spectral Characteristics of Forest Vegetation in Moderate Drought Condition Observed by Laboratory Measurements and Spaceborne, Hyperspectral Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(10): 1121-1127.
- Ponzoni, F. J., Zullo Junior J., and Lamparelli R. A. C., 2006. In-flight absolute calibration of the CBERS-2 IRMSS sensor data, *International*

Journal of Remote Sensing, 27(4): 799-804.

Secker, J., Staenz K., Gauthier R. P., and Budkewitsch P. B., 2001, Vicarious calibration of airborne hyperpsectral sensors in operational environments, *Remote Sensing of Environment*, 76(1): 81-92.

Surface Optics Inc., 2001. Surface Optics webpage hyperspectral imaging system, ([http://www.](http://www.surfaceoptics.com)

[surfaceoptics.com](http://www.surfaceoptics.com))

Teillet P. M., Gedosejevs G., Gauthier R. P., O'Neill N. T., Thome K. J., Biggar S. F., Ripley H., and Meygret A., 2001. A generalized approach to the vicarious calibration of multiple Earth observation sensors using hyperspectral data, *Remote Sensing of Environment*, 77(3): 304-327.