

영상 전처리 수행을 통한 Rededge-M 카메라의 수색 관측에의 활용성 검토

Evaluation of Rededge-M Camera for Water Color Observation after Image Preprocessing

김원국¹⁾ · 노상현²⁾ · 문용선³⁾ · 정성훈⁴⁾

Kim, Wonkook · Roh, Sang-Hyun · Moon, Yongseon · Jung, Sunghun

Abstract

Water color analysis allows non-destructive estimation of abundance of optically active water constituents in the water body. Recently, there have been increasing needs for light-weighted multispectral cameras that can be integrated with low altitude unmanned platforms such as drones, autonomous vehicles, and heli-kites, for the water color analysis by spectroradiometers. This study performs the preprocessing of the Micasense Rededge-M camera which recently receives a growing attention from the earth observation community for its handiness and applicability for local environment monitoring, and investigates the applicability of Rededge-M data for water color analysis. The Vignette correction and the band alignment were conducted for the radiometric image data from Rededge-M, and the sky, water, and solar radiation essential for the water color analysis, and the resultant remote sensing reflectance were validated with an independent hyperspectral instrument, TriOS RAMSES. The experiment shows that Rededge-M generally satisfies the basic performance criteria for water color analysis, although noticeable differences are observed in the blue (475 nm) and the near-infrared (840 nm) band compared with RAMSES.

Keywords : Water Color, Remote Sensing, Micasense Rededge-M, Band Alignment, Preprocessing, Multispectral Camera

초 록

물의 색깔 즉, 수색(水色)을 분석하면 그 물이 함유하고 있는 유색 구성물질의 분포 및 농도를 비파괴적으로 추정할 수 있다. 이러한 분석을 위해 분광복사계를 사용하는데, 최근 드론, 자율운행차, 헬리카이트 등의 저고도 무인 플랫폼에 장착하기 위한 경량 다분광 카메라에 대한 수요가 높아지고 있다. 본 연구에서는 최근 활용 용이성으로 인해 지역적 환경 변화를 모니터링함에 있어 그 활용도가 높아진 Micasense사의 Rededge-M 다분광 카메라의 전처리를 수행하고, 수색관측에의 활용성을 검증하기 위한 분석을 수행하였다. 우선, 영상 형태로 생성되는 자료에서의 Vignette 보정 및 밴드 정렬을 수행하였고, 수색관측을 위해 필요한 하늘, 물, 태양광을 측정된 복사량 그리고 그로부터 최종적으로 도출되는 원격탐사 반사도 관측치를 독립적인 초분광 센서의 관측값과 비교하여 분석하였다. 실험 결과, 전처리 과정을 수행하였을 시, 청색밴드(475 nm)와 근적외선 밴드(840 nm)에서 주목할 만한 차이가 있었지만, Rededge-M은 전반적으로 수색 분석을 위한 기본적인 광학적 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

핵심어 : 수색, 원격탐사, Micasense Rededge-M, 밴드 정렬, 전처리, 다분광 카메라

Received 2019. 05. 30, Revised 2019. 06. 14, Accepted 2019. 06. 26

1) Member, Dept. Civil and Environmental Engineering, Pusan National University (E-mail: wonkook@pusan.ac.kr),

2) REDONE TECHNOLOGIES Co. Ltd. (E-mail: rsh@urc.kr),

3) Dept. Electric Engineering, Sunchon National University (E-mail: moon@sunchon.ac.kr),

4) Corresponding author, Department of Electric Vehicle Engineering, Dongshin University (E-mail: jungx148@gmail.com)

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.

1. 서론

수색(水色)은 주로 자외선, 가시광선부터 근적외선 대역 파장에 관측되는 물의 색깔을 의미하는 말로, 수색 분석을 수행할 시 수중에 분포하는 구성물질의 농도 및 특성을 원격으로 추정할 수 있다. 수색 분석을 통하여 하천 및 해양 표층의 엽록소 농도, 부유물 농도 등 수질(water quality)에 영향을 미치는 일부 변수를 추정할 수 있고, 나아가 일차생산성, 부영양화, 유해조류(有害藻類) 번성, 부유조류(浮遊藻類)의 분포 등 물에서 일어나는 환경 변화 및 생화학적 특성을 파악할 수 있다. 수색 관측은 위성, 항공기, 드론, 헬리콥터 등 다양한 플랫폼을 통해 이루어질 수 있으며, 필요한 분광학적 해상도에 따라 다분광 또는 초분광 센서를 선택하여 운영하여 다양한 시간주기 및 공간범위의 수환경(水環境)을 종관관측(綜觀觀測, synoptic observation)할 수 있다.

이러한 수색 분석을 위하여 분광복사계(分光輻射計, spectroradiometer)가 사용되는데, 분광복사계자료의 전처리에는 기존 해색연구(ocean color study) 분야에서 위성 영상의 활용을 위해 다각도로 연구되어 왔다(O'Reilly *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2010; Le *et al.*, 2013). 최근 저고도 관측 플랫폼(드론, 헬리콥터 등)의 사용이 빈번해지면서 이러한 저고도 관측 플랫폼에 손쉽게 장착할 수 있는 경량 분광복사계에 대한 활용도가 높아지고 있지만(Kim, 2014; Shang *et al.*, 2017; Becker *et al.*, 2019), 카메라 형태의 다분광 복사계의 활용에 대한 연구는 아직 충분히 이루어지지 않고 있다.

수색관측을 위해 고려해야할 전처리과정으로는 복사보정(radiometric calibration), 대기보정(atmospheric correction), 원격반사도(remote sensing reflectance) 추정의 과정이 있고, 특히 카메라 형태의 복사계에 대해서는 영상 왜곡 및 밴드 간 부정합(mis-registration)을 추가적으로 보정해야한다. 영상의 외곽에서 복사휘도(輻射輝度, radiance)가 작게 나타나는 Vignette 효과의 경우, 주로 영상의 중심으로부터 방사(radial) 형태로 왜곡의 크기를 모델링하는 것이 일반적이고 그 원인의 다양성으로 인하여 특정 렌즈나 환경에 대해서 그 계수를 특정하기 어렵기 때문에(Goldman, 2010), 촬영된 영상으로부터 자료기반으로 계수를 구한다(Kim and Pollefeys, 2008; Zheng *et al.*, 2009). 밴드 간 부정합은 각 밴드별로 별도의 광학계나 센서가 사용되거나 밴드 별 촬영 시간의 차이로 인하여 밴드 별 영상이 동일한 관측 기하로 촬영되지 않을 때 발생하는 현상으로, 렌즈 위치의 차이가 계속되어 있을 경우 그 위치 벡터를 직접 이용하거나 또는 계량되어 있지 않아도 밴드 영상간의 대응점을 찾아내어 관측 기하의 차이를 물

리적으로 모델링하여 교정할 수 있다(Zitova *et al.*, 2003; Jhan *et al.*, 2016).

본 연구에서는 최근 국내외적으로 자주 활용되고 있는 다분광 카메라인 Micasense사의 Rededge-M 전처리 과정이 수색관측에 적합한지를 분석한다. 우선 각 밴드의 영상이 나타내는 영상 왜곡량을 분석하고, 밴드 정렬을 수행하여 보정 결과를 분석하였다. 또한, 수색관측을 위해 필요한 복사휘도 및 복사조도(輻射照度, irradiance) 계산을 수행하였고 Rededge-M 카메라에서 최종적으로 얻어지는 복사량 검증을 위하여 수색분석에서 전통적으로 사용되어 오던 초분광 센서인 TriOS사의 RAMSES센서의 관측값을 이용하여 복사량을 비교 분석하였다.

2. 장비 및 자료 획득

2.1 Micasense Rededge-M

Rededge-M 카메라는 총 다섯 개의 분광채널을 가진 다분광 카메라로, 카메라 본체, DLS (Downwelling Light Sensor) 센서, GPS (Global Positioning System) 모듈의 세 부분으로 구성되어 있다(Fig. 1(a)).

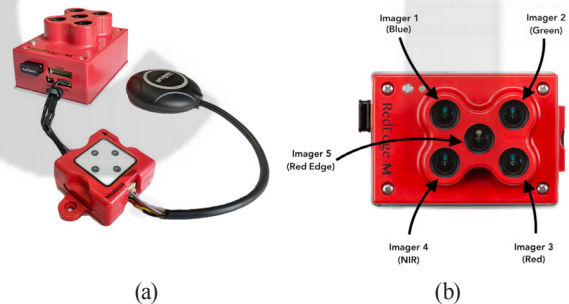


Fig. 1. (a) Rededge-M camera with the DLS sensor and the GPS module, (b) Aperture alignment for the 5 spectral bands

센서의 총 무게는 170 g, 크기는 9.4 cm x 6.3 cm x 4.6 cm로, 무게와 크기에 제약을 많이 받는 드론에 활용하기에 적합한 영상 센서라고 할 수 있다. 다섯 개의 밴드는 각각 475, 560, 668, 717, 840 nm에 중심파장을 가지고 있고, Fig. 1(b)에서 보듯이 각각 다른 렌즈와 개구(aperture)를 통해 촬영이 이루어진다. 각 밴드의 밴드폭(bandwidth)은 반값너비(FWHM: Full Width at Half Maximum) 기준으로 각각 20, 20, 10, 10, 40 nm이다. 고도 120 m에서 비행 시, 지상에서의 공간해상도는 픽셀 당 약 8.2 cm이다. 센서 본체 파트와는 별도로 하

향복사조도(E_d : Downward Irradiance)를 추정하기 위한 참조패널(reference panel)이 제공되는데(Fig. 2), 패널의 반사도는 만들어진 제품마다 다르기 때문에 케이스에 동봉된 QR 코드에 접속하거나 코드 상단에 적힌 반사도 수치를 통해 확인해야 한다.

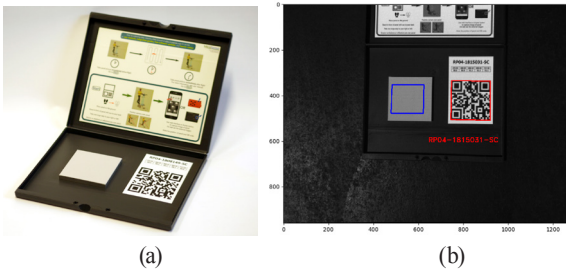


Fig. 2. (a) The package that contains the reference panel and the QR code which directs users to the reflectance information of the panel, and (b) the Rededge-M image with the panel and the QR code portions detected automatically

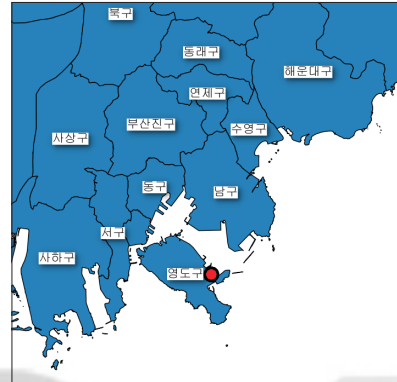
2.2 TriOS RAMSES

TriOS RAMSES는 총 두개의 복사휘도 센서(ARC-VIS, 7° FOV)와 하나의 복사조도 센서(ACC-VIS)로 구성되어 있고 두 센서 모두 대략 280-950 nm 범위의 빛을 약 3 nm 간격으로 관측하는 초분광 센서이다. 두 개의 복사휘도 센서는 연직면상에 위치시키며 두 센서의 상대각이 100°가 되게 장치하였다. 복사조도 센서는 하향 태양광이 가려지지 않도록 주로 주변에서 가장 높은 곳에 위치하도록 설치하는 것이 일반적이는데 본 연구의 경우 사방이 트인 곳에 2 m 가량의 장대를 이용하여 복사휘도와 약 10 m 정도 떨어진 곳에 설치하였다. 하향복사조도(E_d)의 경우 장애물이 없을 경우, 수평적이 위치에 크게 영향을 받지 않기 때문에, 복사휘도 센서와 동일한 장소에 설치하는 것 보다는 주변에 장애물이 없도록 하는 것에 중점을 두어 위치를 선정하였다. RAMSES는 3개의 센서가 각각 세 가지 복사량을 독립적으로 측정하기 때문에, 하나의 센서를 이용해 순차적으로 복사량을 획득하는 장비에서 나타나는 관측환경의 시간적 변화를 고려하지 않아도 되는 장비이다.

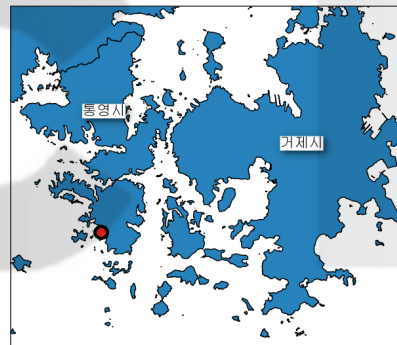
2.3 수색관측 프로토콜

수색 분석을 위한 영상 획득은, 기존 해색연구에서 실행되고 있는 관측 프로토콜을 따라, 한 위치에 대해서 총 3종의 영상을 획득하였다. 총복사휘도(L_w : Total Water Radiance)는

관측하고자 하는 물을 향해 하방으로 천정각 40°, 그리고 방위각(方位角, azimuth angle)은 태양에 대하여 135°를 유지하여 촬영하였고, 대기복사휘도(L_{sky} : Sky Radiance)는 같은 방위각을 유지한 채로 상방으로 천정각 40°를 조준하여 촬영하였다. 레퍼런스 패널을 촬영할 때는 총복사휘도를 촬영하는 관측기하와 동일하게 하여 관측하였다.



(a)



(b)

Fig. 3. Location of two observation stations: (a) the seashore of Yeongdo island in Pusan, and (b) the seashore of Tongyeong

2.4 테스트 및 검증 자료의 획득

Rededge-M 자료의 분석을 위해서 두 장소에서 영상자료를 획득하였다. 우선, 영상 전처리 과정을 테스트하기 위하여 부산시 영도구에 위치한 해양박물관 앞에서 해수(海水)에 대한 영상을 취득하였고(2018년 8월 17일, 오후 1시 33분)(Fig. 3(a)), 두 번째, 초분광 센서와의 비교를 위해서는 통영시에 위치한 연명항 인근에서 RAMSES 센서와 동시에 관측이 되도록 해수 영상을 취득하였다(2018년 8월 6일, 오후 12시 07분)(Fig. 3(b)). RAMSES 센서는 FOV 7°를 가지는 비영상 형태의

센서이기 때문에, Rededge-M 영상 중앙 부분의 100×100 pixel를 오래내어 평균한 값을 RAMSES의 관측값과 비교하였다.

3. 카메라 영상의 전처리

본 연구에서 이루어진 영상 전처리는 Micasense사에서 Rededge-M 카메라를 위해 구축한 Python 라이브러리를 사용하여 수행하였다(<https://github.com/micasense/imageprocessing>).

3.1 복사휘도로의 변환

Rededge-M 카메라로 촬영한 자료는 일차적으로 전자신호인 DN (Digital Number)으로 기록되는데, 수색분석을 위해서는 아래 식을 통해 복사휘도값으로 변환해야한다.

$$L = V(x, y) \frac{c_1}{g} \frac{d_n - d_{bl}}{t_e + c_2 y - c_3 t_e y} \quad (1)$$

여기서, d_n 은 영상내 각 픽셀의 정규화된 DN값, d_{bl} 은 암흑 관측값, c_1, c_2, c_3 는 복사보정 계수, $V(x, y)$ 은 Vignette 왜곡 보정 함수, t_e 는 영상의 노출 시간, g 는 센서 이득값(gain), (x, y) 는 픽셀의 영상좌표, L 은 복사휘도(단위: $W/m^2/sr/nm$)를 나타낸다. 복사휘도를 계산하기 위한 변수는 모두 영상의 meta data에 저장되어 있다. DN값의 정규화는 16-bit자료의 경우 65536으로, 12-bit자료의 경우 4096으로 나누어줘서 정규화된 값의 범위가 0에서 1사이에 들어오도록 변환한다. Vignette 왜곡은 아래 함수와 같이 기준 좌표로부터의 거리에 대한 다항식으로 정의되어 있고, 각 계수는 역시 영상자료의 meta data에 저장되어 있다.

$$V(x, y) = 1/k$$

$$k = 1 + k_0 r + k_1 r^2 + k_2 r^3 + k_3 r^4 + k_4 r^5 + k_5 r^6 \quad (2)$$

$$r = \sqrt{(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2} \quad (3)$$

여기서 $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ 는 보정계수, c_x, c_y 는 기준 영상 좌표를 나타낸다.

3.2 밴드 정렬

Fig. 1(b)에서 보듯이 Rededge-M 카메라의 5개 밴드는 개구(開口, aperture)의 위치가 다르기 때문에, 5개 밴드의 영상

을 정렬 없이 그대로 중첩시켰을 경우 각 픽셀의 위치가 일치하지 않게 된다. 따라서 각 밴드의 영상을 기준 밴드 영상의 좌표계로 변환하여 정렬(alignment)시켜야 한다. 객체좌표계에 있는 점 $[X_o, Y_o, Z_o]$ 을 영상좌표계의 점 $[u, v]$ 로 변환하는 행렬은 동차좌표계(homogeneous coordinate)를 사용하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} {}^c R_o & {}^c t_o \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} = K {}^c M_o \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

이 때, K 는 카메라의 교정행렬(calibration matrix), R 은 회전행렬(rotation matrix) 그리고 t 는 평행이동을 나타내는 벡터이다. 객체좌표계에서 카메라 좌표계 $[X_c, Y_c, Z_c]$ 로의 변환은 교정행렬 변환을 수행하기 전까지의 변환임으로 아래와 같이 표현할 수 있고

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = {}^c M_o \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

첫 번째 카메라 좌표계(c_1)에서 두 번째 카메라 좌표계(c_2)로의 Homography 변환 2M_1 은

$${}^c_2 M_{c_1} = {}^c_2 M_o {}^o M_{c_1} = {}^c_2 M_o ({}^c_1 M_o)^{-1} \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 수색 관측 시 가장 큰 복사휘도를 가지는 청색 밴드(475 nm) 영상을 기준으로 나머지 4개 밴드의 영상의 좌표를 변환하였다.

3.3 원격탐사 반사도의 계산

수중 물질의 분포 및 농도(abundance)를 정확히 추정하기 위해서는, 물을 관측한 영상에서 표면 반사를 제거하여 수괴(水塊) 내부에서 올라오는 복사량 즉, 수출복사휘도(水出輻射輝度, water-leaving radiance; L_w)를 정밀하게 계산할 수 있어야 한다. 표면반사를 제거하기 위하여, 물을 촬영하는 하향(下向) 천정각(天頂角, zenith angle)과 동일한 크기의 상향(上向) 천정각을 유지하여 대기복사휘도(L_{sky})를 측정 후, 표면반사효율(Fresnel reflectance; ρ_f)을 곱하여 물의 총복사휘도(L_w)에서 차감해야한다(Lee et al., 1999).

$$L_w = L_u - \rho_f L_{sky} \quad (7)$$

이렇게 계산된 수출복사휘도는 시간별 관측 태양복사량에 따라 변화하기 때문에, 수색분석을 위해서는 복사휘도를 태양광 하향복사조도(E_d)로 나눠서 일종의 정규화된 값인 원격탐사반사도(R_{rs} : Remote Sensing Reflectance)를 얻어내게 된다.

$$R_{rs} = \frac{L_u}{E_d} \quad (8)$$

각 파장대별(λ) 하향복사조도(E_d)는 아래 식을 통해 참조패널의 복사휘도를 이용하여 계산할 수 있다.

$$E_d(\lambda) = \pi L_{pan}(\lambda) / \rho(\lambda) \quad (9)$$

이 때, E_d 는 하향복사조도, L_{pan} 는 참조패널의 복사휘도, ρ 는 패널의 반사도이다. 본 연구에 사용된 패널의 반사도는 밴드별로 50.6%, 50.9%, 51.1%, 51.2%, 51.1%이다. 패널을 찍은 영상은 참조패널 부분뿐만 아니라 다른 물체도 촬영이 되기 때문에, 패널 영역만을 자동으로 추출하는 모듈을 적용하였다(Fig. 2(b)). 패널 영역에 해당하는 픽셀들에 대한 복사휘도를 추출한 후 그 픽셀들의 평균값을 대표 복사휘도로 사용하였다.

4. 결 과

4.1 복사보정

영도에서 획득한 총복사휘도(L_w) 영상에 대하여 Vignette 효과를 계산한 결과를 Fig. 4(a)에 나타내었다. Vignette 왜곡은 영상 중심 부근의 기준점에서의 거리를 기준으로 모의되기 때문에 영상의 네 모퉁이에서 왜곡이 가장 크게 나타난다. 5개 밴드 모두에서 네 모퉁이에서의 최대 왜곡이 20% 이상이었고, 근적외선 밴드(865nm)의 경우 그 크기가 80%까지 나오는 것을 확인할 수 있었다. 영상의 좌우, 상하 1/4, 3/4 지점에서는 밴드별로 약 10%, 15%, 20%, 40% 가량을 나타내었고, 마지막 red edge 밴드(717nm)의 경우 약 30%를 나타내어, Vignette 보정을 수행하지 않을 경우 큰 오차를 유발시킬 수 있음을 알 수 있었다. 대기복사휘도(L_{sky}) 영상의 경우에도 Vignette 왜곡은 유사하게 추정이 되었으며, 보정을 통해 주변 부의 왜곡이 감소하였다.

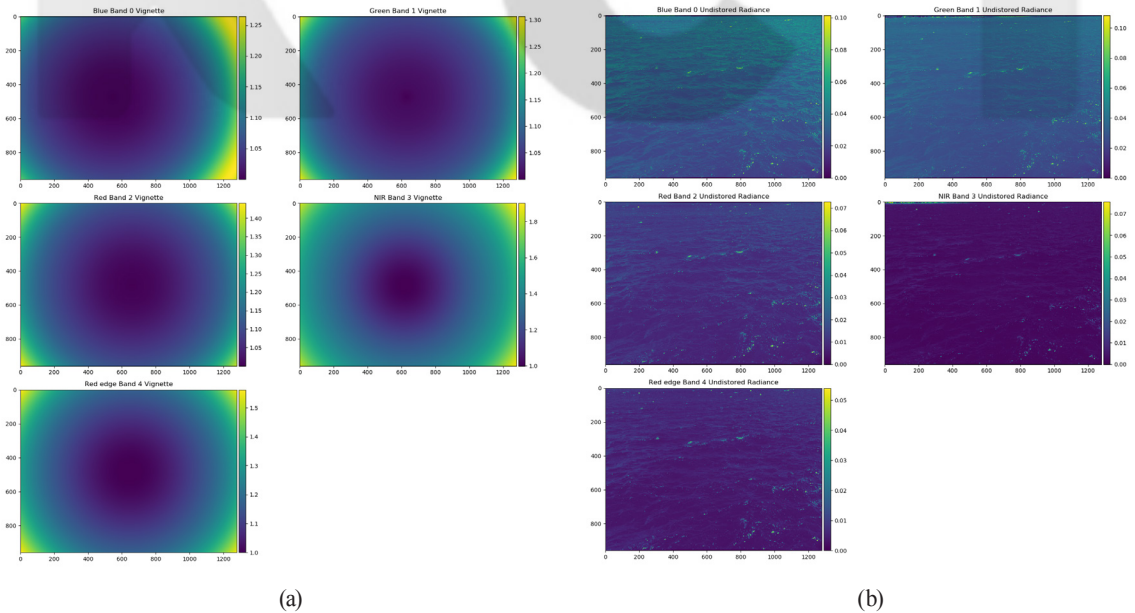


Fig. 4. (a) Correction factor of Vignette model derived for the 5 spectral bands for total water radiance(L_w), and (b) total water radiance after the radiometric correction including the Vignette correction

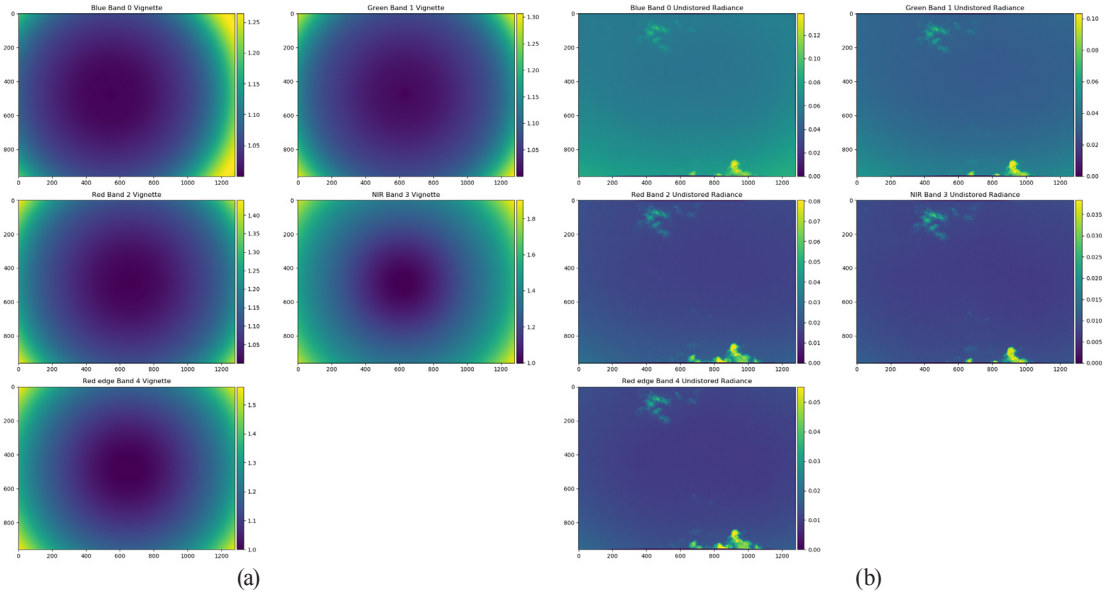


Fig. 5. (a) Correction factor of Vignette model derived for the 5 spectral bands for sky radiance(L_{sky}), and (b) sky radiance after the radiometric correction including the Vignette correction

4.2 밴드 정렬

Homography 변환을 통하여 첫 번째 밴드인 청색 밴드(475 nm)를 기준으로 나머지 밴드의 영상을 기준영상에 정렬하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 영상정렬 없이 각 밴드를 중첩할 경우 10 pixel 이상의 위치편차가 발생하였고, 이러한 편차는 피사체까지의 거리에 따라 일정치 않기 때문에 다차식 영상변환 모델로는 엄밀한 정렬이 되지 않는다. Homography 변환을 통하여 관측기하를 모델링하여 변환한 결과, 영상 전체 영역에 걸쳐 고르게 정렬이 잘 이루어져 밴드 간 오차가 1 픽셀 이내로 줄어들었다. 하지만, 영상내의 위치에 따라 정렬의 성능에 차이가 있음을 확인하였다. 예를 들어, 대상물이 빠르게 이동하는 물 영상의 경우 영상 하단이 영상 중앙보다 더 큰 오차를 나타내어 1 픽셀 정도의 차이를 나타내기도 하였다. 변환을 통하여 영상이 담아내는 전체 영역은 변환 전후가 다를 수 있는데, 본 연구에서 사용된 Rededge-M 카메라의 경우 수평선, 물, 대기 영상 모두에서 연구 목적에 큰 영향을 미치지 않는 정도의 변두리 부분(10 픽셀 이내)이 사용할 수 없는 부분으로 나타났다.

4.3 복사량 및 반사도 계산

부산 영도에서 촬영한 자료에 대한 총복사휘도(L_u) 및 대기복사휘도(L_{sky}) 스펙트럼을 Fig. 7과 같이 도시하였다. 총복

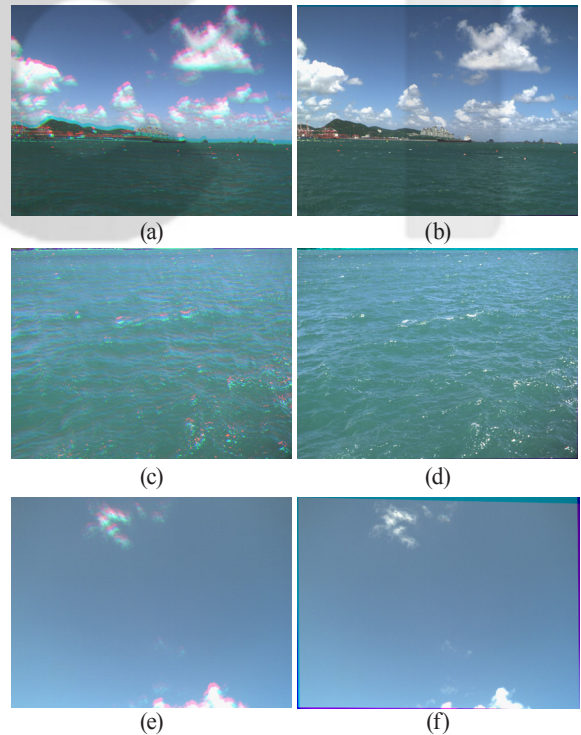


Fig. 6. RGB composite images for (a) horizontal view, (c) water, and (e) sky before the band alignment, and the images after the band alignment for (b) horizontal view, (d) water, and (f) sky

사휘도(L_w)의 대푯값 선정 기준은 다음과 같다. 해수 표면에서 일어나는 반사는 수표면의 기울기에 따라 달라지는데 대기복사나 태양복사가 직접적으로 카메라에 반사되는 기하형태가 되면 표면반사가 강하게 나타나 총복사휘도(L_w)의 값이 높아지게 된다. 이 때, 표면반사가 이루어진 수표면의 기울기를 알고, 촬영순간의 바람속도, 그리고 해당 수표면 지점에 입사된 대기복사휘도(L_{sky})를 정확히 알면 엄밀한 보정이 가능하지만 현장에서 그 값들을 모두 알기는 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 카메라 영상에 찍힌 수괴(水塊)의 영역이 충분히 작아서 카메라에 촬영된 전체 영역에서의 해수 특성이 변하지 않는다고 가정하고, 총복사휘도(L_w) 영상에서 하위 25% 이하의 복사휘도를 가지는 픽셀들을 선별한 후 그 픽셀들의 평균값을 구하여 총복사휘도(L_w)의 대푯값으로 사용하였다. 대기복사휘도(L_{sky})의 경우, 영상의 어느 픽셀이 총복사휘도(L_w) 영상의 해당 픽셀에 반사되어 카메라에 입사되었는지 기하학적으로 정확히 계산하기가 어렵기 때문에, 전체영상의 평균값을 대표 대기복사휘도(L_{sky})로 간주하였다.

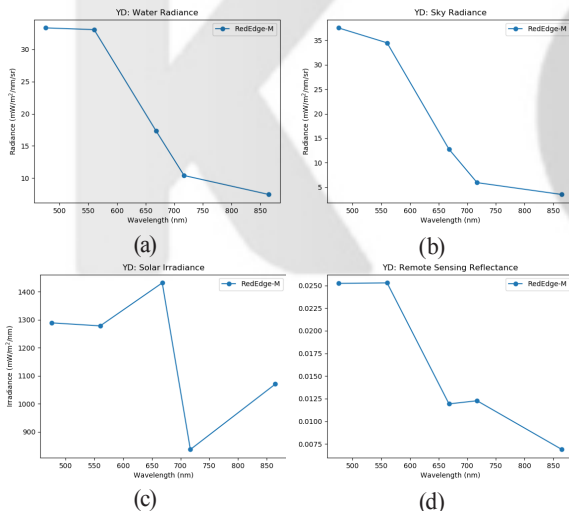


Fig. 7. Spectrum for (a) total water radiance(L_w), (b) sky radiance(L_{sky}), (c) downward solar irradiance(E_d), and (d) remote sensing reflectance(R_{rs})

Fig. 7에서 보는바와 같이 총복사휘도(L_w), 대기복사휘도(L_{sky}), 원격탐사반사도 모두 청색대역에서 가장 크고, 근적외선 대역으로 갈수록 낮아지는 일반적인 형태를 가지고 있음이 확인되었다. 다만 하향복사조도(E_d)의 경우는(Fig. 7(c)) 717 nm 밴드에서 급격하게 작은 값을 가지는 것으로 나타났

는데, 이는 뒤에서 RAMSES 센서와의 비교 결과에서도 확인 되듯이 717 nm 주변에 수증기 흡광대역이 존재하기 때문이다. 668 nm에서의 복사조도가 475 nm, 560 nm와 비교하여 큰 값을 가지는 것으로 나타났는데, 이는 일반적인 하향조도의 형태는 아니기 때문에 이러한 현상의 발생 원인에 대하여 추후 추가적인 분석이 필요하다.

Fig. 7(d)에서 도출된 원격탐사반사도 스펙트럼을 보면, rededge 밴드(717 nm)에서의 반사도가 엽록소에 의한 형광신호로 인하여 인근 밴드인 668 nm, 840 nm 보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 형광신호로부터 엽록소 농도를 추정할 때 사용하는 기법인 형광선형고도(FIH: fluorescence line height)(Neville and Gower, 1977) 등의 기법에 대한 사용 가능성을 보여준다. 해당 반사도 스펙트럼의 모양은 부유퇴적물에 크게 영향을 받은 수괴의 스펙트럼은 아니기 때문에, 근적외선 밴드(840 nm)의 상당히 높은 반사도(0.0075 sr^{-1})는 태양광 및 대기복사의 수표면 반사나 표면 백파(白波, white cap) 또는 scum에 의한 것일 수 있고 추후 840 nm의 반사도가 0에 가깝게 되도록 전체 반사도를 차감해야 할 필요가 있다.

4.4 RAMSES 센서와의 비교

Rededge-M 카메라에서 획득한 복사량 및 도출된 원격탐사반사도를 초분광센서인 RAMSES 센서와 비교한 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 총복사휘도(L_w)의 경우, Rededge-M 카메라가 475 nm에서 다소 낮게, 840 nm에서는 반대로 다소 높게 나타났고, 나머지 밴드에서는 유사하게 관측이 되었다. 대기복사휘도(L_{sky})의 경우는 전반적으로 두 센서가 유사한 값을 보이지만, Rededge-M 카메라가 560 nm, 668 nm 밴드에서 다소 높은 값을 나타내었다. 하향복사조도(E_d)는 앞서 설명되었듯이 717 nm에서 대기 중의 수증기 흡광으로 인하여 두 센서 모두 낮은 값을 나타내었는데, RAMSES의 복사조도보다 더 낮은 Rededge-M 조도가 관측되었다. 475 nm 및 560 nm에서도 Rededge-M이 낮은 복사휘도값을 보여주었는데, 반대로 근적외선(840 nm)에서는 다소 높은 값을 나타내었다. 앞 3종의 복사량의 차이에도 불구하고, 원격탐사 반사도는 앞 3종의 복사량에서의 차이보다 더 작은 센서 간 차이를 나타내었다. 하지만 여전히 근적외선(840 nm)의 값은 RAMSES보다 다소 높은 것으로 관측되었다.

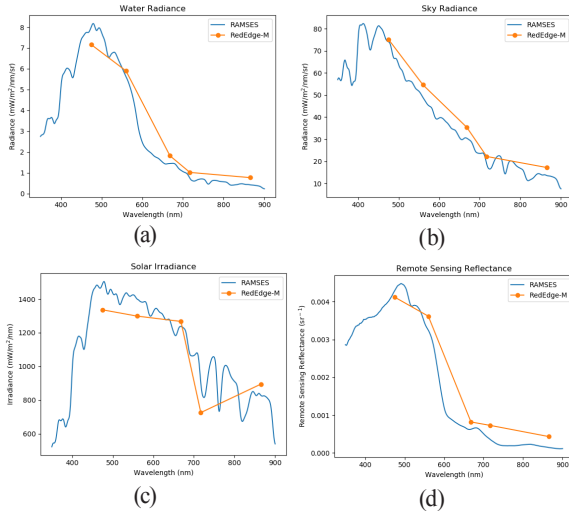


Fig. 8. Spectrum obtained by Rededge-M camera and RAMSES sensor for (a) total water radiance(L_w), (b) sky radiance(L_{sky}), (c) downward solar irradiance(E_d), and (d) remote sensing reflectance(R_{rs})

앞 영도에서의 원격탐사반사도가 가지는 475 nm - 560 nm의 경사로 미루어보았을 때, 영도의 수위가 더 높은 엽록소 농도를 가지고 있었던 것으로 보이며, 이는 통영 RAMSES 자료의 670 nm 부근에 나타난 형광 신호가 작은 것을 통해서도 확인할 수 있다. 이 형광 신호는 같은 통영에서 찍은 Rededge-M 카메라 반사도 스펙트럼에서는 잘 포착되지 않음을 볼 수 있다. 형광 신호의 피크는 주로 685 nm에서 형성되고 엽록소 농도가 높아질수록 700 nm 쪽으로 옮겨간다는 사실에 비추어 보았을 때(Neville and Gower, 1977), Rededge-M 카메라의 밴드 구성(668 nm, 717 nm)은 낮은 수중 엽록소 농도를 형광 신호로 정량화하기에는 다소 이상적이지 않은 파장 중심 설정으로 볼 수 있다. 685 nm 대역에서 피크 값을 가지기 시작하는 엽록소의 형광 신호는 Rededge-M 카메라의 668 nm 밴드가 일정 부분 포착할 수 있지만, 그럴 경우 FLH 알고리즘을 적용하기 위해서는 668 nm 보다 짧은 파장대역에 기준 밴드가 있어야 한다. 엽록소 농도가 높아짐에 따라 형광 신호의 피크 685 nm 보다 더 큰 파장으로 옮겨가는데, Fig. 8에서 볼 수 있듯이 이럴 경우 668 nm, 717 nm, 840 nm의 3개 밴드를 이용하여 FLH 알고리즘을 구성할 수 있음을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 다분광 카메라인 Rededge-M의 전처리 결과를

분석한 후, 수색분석에 주로 활용되는 초분광 센서인 TriOS RAMSES와의 비교를 통하여 Rededge-M 카메라의 수색분석에의 활용성을 검토하였다. 우선, 이차원 센서를 통하여 영상형태의 자료를 취득하기 때문에 발생하는 영상 왜곡을 보정하였고, 밴드 간 영상의 정렬을 수행함으로써 픽셀별 분광학적 분석이 가능하도록 전처리를 수행하였다. 영상 왜곡은 영상 내의 위치와 밴드에 따라 달랐지만, Vignette 효과로 인한 왜곡은 평균적으로 10%를 웃도는 것으로 나타났다. 복사량의 오차는 그대로 원격탐사반사도의 오차로 전파되기 때문에, 영상내의 모든 픽셀을 사용하기 위해서는 왜곡 보정이 필수적인 전처리임을 알 수 있었다. 밴드 정렬을 수행하지 않을 경우, 10 픽셀 이상의 위치 오차가 발생함을 확인하였고, 이는 homography 변환을 통한 밴드 정렬을 수행하였을 시 1 픽셀 이내의 정확도로 만족할만한 보정이 이루어짐을 확인하였다.

수색분석에서 높은 신뢰도를 가지고 사용되는 TriOS RAMSES 센서와의 비교분석 결과, Rededge-M의 복사량은 신뢰할만한 수준의 성능을 나타내는 것으로 확인되었다. 두 센서간의 관측값의 차이를 보면(Fig. 8), 관측값에 영향을 미치는 센서 외적인 요인, 즉 관측 기하의 차이, 영상-비영상 센서간의 정합 오차, 광학적 환경의 차이, 부족한 반복 실험 횟수 등을 고려했을 때 Rededge-M과 RAMSES 간의 성능이 크게 차이가 난다고 보기 어렵다. 다만, Rededge-M 센서의 근적외선 밴드(840 nm)의 복사휘도와 복사조도가 RAMSES보다 일관되게 낮게 나오는 점, 그리고 반대로 청색밴드(475 nm)에서의 복사휘도 및 조도가 다소 작게 나오는 것을 확인하였다.

Rededge-M 카메라에 해석 센서가 흔히 가지고 있는 청색 밴드인 412 nm 나 443 nm 밴드가 없다는 점은 Fig. 8에서 보듯이 청색 대역에서 엽록소 흡광 및 용존유기물에 의해 반사도가 낮아지는 현상을 포착하기 힘들다는 점이 있다. 하지만, Fig. 8(c)에서 보듯이 Rededge-M의 475 nm 밴드가 대기 기체 흡광이 적은 파장대에 위치하고 있고 엽록소로 인한 흡광이 다소 반영이 되고 있음을 알 수 있다. 식물성 플랑크톤의 약한 형광 신호를 포착하기 위해서는 현재의 717 nm 보다는 보다 더 짧은 파장대(690 nm - 700 nm)에 밴드가 필요하지만, 형광신호가 강할 때는 현재의 717 nm 밴드에서도 그 신호가 포착됨을 볼 수 있었다.

종합적으로 볼 때, Rededge-M 카메라 센서는 제시된 전처리를 완료하였을 시, 수색분석을 위한 분광학적인 기본성능을 나타내고 있다고 판단되고, 추후 수색 자료를 통해 추정이 가능한 엽록소 농도 및 부유퇴적물 농도 추정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 450 nm 이하의 분광밴드가 없다는 점은 용존유기물 농도 추정을 수행하기에는 다소 어려울 것

으로 보이며, 용존 유기물의 영향에 의해 엽록소 농도의 추정 불확도가 크게 나타날 수 있는 밴드 구성이다. 비영상 형태의 센서와 비교하여, 근접거리 카메라 센서 자료는 수면 기울기에 따른 표면 반사효율(ρ)의 공간적 변화, 백파나 파도에 의한 그림자(wave shadow) 등이 보다 명확히 관찰되기 때문에 그러한 현상에 대한 추가적인 정보를 더 취득할 수 있지만, 수괴의 광학적 특성 추출을 위해서는 그들이 총복사휘도(L_w)에 미치는 영향을 정확하게 제거해내는 기법에 대한 연구가 필요하다 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 전남테크노파크의 연구개발 사업인 “지역수요 맞춤형 연구개발사업”의 “해양 환경 관측 드론을 이용한 양식장 피해저감 모니터링 시스템 개발”과제의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Becker, R.H., Sayers, M., Dehm, D., Shuchman, R., Quintero, K., Bosse, K., and Sawtell, R. (2019), Unmanned aerial system based spectroradiometer for monitoring harmful algal blooms: A new paradigm in water quality monitoring, *Journal of Great Lakes Research*, Vol. 45, No. 3, pp. 444-453.
- Goldman, D.B. (2010), Vignette and exposure calibration and compensation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 32, No. 12, pp. 2276-2288.
- Jhan, J., Rau, J., and Huang, C. (2016), Band-to-band registration and ortho-rectification of multilens/multispectral imagery: A case study of MiniMCA-12 acquired by a fixed-wing UAS, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 114, pp. 66-77.
- Kim, H. (2014), *Utilization Plan of Drones for the Field of Ocean and Fishery*, Issue Analysis Report No. 2014-06, Korea Maritime Institute (KMI), Busan, pp. 5-36. (in Korean)
- Kim, S.J., and Pollefeys, M. (2008), Robust radiometric calibration and vignetting correction, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 30, No. 4, pp. 562-576.
- Le, C.F., Hu, C.M., Cannizzaro, J., English, D., Muller-Karger, F., and Lee, Z. (2013), Evaluation of chlorophyll-a remote sensing algorithms for an optically complex estuary, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 129, pp. 75-89.
- Lee, Z., Ahn, Y.H., Mobley, C., and Arnone, R. (2010), Removal of surface-reflected light for the measurement of remote-sensing reflectance from an above-surface platform, *Optics Express*, Vol. 18, No. 25, pp. 26313-26324.
- Lee, Z., Carder, K.L., Mobley, C.D., Steward, R.G., and Patch, J.S. (1999), Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization, *Applied Optics*, Vol. 38, No. 18, pp. 3831-3843.
- Neville, R.A., and Gower, J.F.R. (1977), Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll α fluorescence, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82, No. 24, pp. 3487-3493.
- O'Reilly, J.E., Maritorena, S., Mitchell, B.G., Siegel, D.A., Carder, K.L., Garver, S.A., Kahru, M., and McClain, C. (1998), Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, Vol. 103, No. C11, pp. 24,937-24,953.
- Shang, S., Lee, Z., Lin, G., Hu, C., Shi, L., Zhang, Y., Li, X., Wu, J., and Yan, J. (2017), Sensing an intense phytoplankton bloom in the western Taiwan Strait from radiometric measurements on a UAV, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 198, pp. 85-94.
- Zheng, Y., Lin, S., Kambhamettu, C., Yu, J., and Kang, S.B. (2009), Single-image vignetting correction, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 31, No. 12, pp. 2243-2256.
- Zitova, B., and Flusser, J. (2003), Image registration methods: A survey, *Image and Vision Computing*, Vol. 21, No. 11, pp. 977-1000.