현장관측용 분광 광도계의 상대 검교정 시스템 개발

오은송*,** · 안기범*,** · 강혁모*,** · 조성익*,** · 박영제*†

*한국해양과학기술원 해양위성센터, **연세대학교 천문우주학과 우주광학연구실

Development of relative radiometric calibration system for in-situ measurement spectroradiometers

Eunsong Oh***, Ki-BeomAhn***, Hyukmo Kang***, Seong-Ick Cho*** and Young-Je Park**†

*Korea Ocean Satellite Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

**Space Optics Laboratory, Dept. of Astronomy, Yonsei University

Abstract : After launching the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) on June 2010, field campaigns were performed routinely around Korean peninsula to collect in-situ data for calibration and validation. Key measurements in the campaigns are radiometric ones with field radiometers such as Analytical Spectral Devices FieldSpec3 or TriOS RAMSES. The field radiometers must be regularly calibrated. We, in the paper, introduce the optical laboratory built in KOSC and the relative calibration method for in-situ measurement spectroradiometer. The laboratory is equipped with a 20-inch integrating sphere (USS-2000S, LabSphere) in 98% uniformity, a reference spectrometer (MCPD9800, Photol) covering wavelengths from 360 nm to 1100 nm with 1.6 nm spectral resolution, and an optical table ($3600 \times 1500 \times 800 \text{ mm}^3$) having a flatness of $\pm 0.1 \text{ mm}$. Under constant temperature and humidity maintainance in the room, the reference spectrometer and the in-situ measurement instrument are checked with the same light source in the same distance. From the test of FieldSpec3, we figured out a slight difference among in-situ instruments in blue band range, and also confirmed the sensor spectral performance was changed about 4.41% during 1 year. These results show that the regular calibrations are needed to maintain the field measurement accuracy and thus GOCI data reliability.

Key Words : Radiometric calibration, Analytical Spectral Devices (ASD), spectroradiometer

요약 : 천리안해양관측위성(Geostationary Ocean Color Imager, GOCI)이 2010년 6월에 발사된 이후, 영상 자료의 보정과 검증을 위한 여러 차례의 현장 관측이 한반도 주변에서 수행되었다. 한국해양과학기술원 해양위성센터(Korea Ocean Satellite Center, KOSC)에서는 Analytical Spectral Devices (ASD)사의 분광 광도계 FieldSpec3나 TriOS사의 분광 광도계 RAMSES와 같은 현장관측장비의 특성 변화를 확인하기

접수일(2014년 3월 27일), 수정일(1차 : 2014년 7월 14일), 게재확정일(2014년 7월 14일).

† 교신저자: 박영제(youngjepark@kiost.ac)

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.

위하여 미국국립표준기술원(National Institute of Standards and Technology, NIST)의 표준화 절차를 거친 광원과 표준 분광 광도계를 이용하여 각각의 현장 관측마다 기기의 성능을 측정하였다. 본 논문에서는 해양위성센터에 구축된 광학 실험실과 현장관측 분광 광도계의 상대적 복사 검교정 방법에 대해서 소개하고 있다. 광학 실험실은 98% 이상의 광원 균질성을 지니는 20인치 적분구(USS-2000S, LabSphere)와 360 nm 부터 1100 nm 까지 1.6 nm 파장 간격으로 측정이 가능한 표준 분광 광도계(MCPD9800, Photol), 그리고 ± 0.1 mm의 편평도를 가지는 광학테이블($3600 \times 1500 \times 800$ mm³)을 기본으로 구성되어 있다. 실험실 내부는 정확한 검교정 실험을 위하여 일정한 온습도를 유지하고 있으며, 동일한 광원에 동일한 위치에서 표준과 현장관측용 분광 광도계를 동시에 측정하는 방법을 기본으로 한다. 해양위성센터가 보유하고 있는 ASD를 측정한 결과, 현장관측용 분광광도계의 결과가 푸른 가시광 영역에서 미세한 차이가 측정 시마다 나타나는 것을 확인하였고, 더불어 1년간의 상대 검교정 실험에 따르면 평균적으로 4.41% 정도의 파장별 광특성이 변화하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 측정 정확도를 유지하고, GOCI 자료의 신뢰도를 확보하기 위하여 지속적인 검교정 실험을 수행해야 하는 이유를 보여주고 있다.

1. 서론

원격탐사에서 인공위성 영상은 짧은 시간에 넓은 영역의 관측 정보를 얻어내기 위해 사용된다. 인공위성 영상의 원시자료로부터 원하는 정보로 만들어내기 위해서는 복사보정, 기하보정, 대기보정과 같이 여러 보정단계가 필요하다(Richards and Jia, 1999). 또한 인공위성 센서의 고유의 특성으로 인해 공간해상도나 분광해상도 등이 각 센서마다 다르기 때문에 같은 영역에 대한 위성 영상이라도 취득 후 처리된 영상 정보는 달라질 수 있다.

이러한 이유로 인해 원하는 영상 정보가 어느 정도의 신뢰도를 갖는지를 파악하고, 영상 보정의 정확도를 향상시키기 위하여 촬영 지역에 대한 현장관측을 수행한다 (Bailey and Werdell, 2006; Hooker and McClain, 2000; Schowengerdt, 2006). 이러한 현장 관측에서 널리 쓰이는 장비가 각 파장별로 절대적 광량을 측정할 수 있는 분광 광도계이고, 이는 육상 원격탐사뿐만 아니라 해양 관측에서도 해색위성 자료의 검보정 용도로 사용되고 있다 (Lee *et al.*, 2011; Moon *et al.*, 2012).

2010년 6월 천리안 해양관측위성(Geostationary Ocean

Fig. 1. In-situ measurement using spectrometer (ASD FieldSpec3). $L_{sky}(\lambda)$ indicates the sky radiance which is measured by aiming the sky upward by about 30° to clear sky. The water leaving radiance L_w is measured with viewing zenith angle 30° to sea water, and the down-welling irradiance, E_d , is measured with Remote Cosine Receptor (RCR) of spectrometer.

Color Imager, GOCI)이 발사된 이후, 위성 영상의 검증을 위하여 해양위성센터(Korea Ocean Satellite Center, KOSC)에서 2010년부터 2011년까지 325 정점에 대해서 분광 광도계를 이용한 현장 조사를 수행하였으며, 현재까지도 지속적인 검보정 연구를 수행 중에 있다(Moon *et al.*, 2012). Fig. 1에서와 같이, 해양에서는 분광 광도계를 사용하여 해수수출광량($L_w(\lambda)$, $W/m^2/nm/sr$), 대기산란복사휘도($L_{sky}(\lambda)$, $W/m^2/nm/sr$), 하향복사조도($E_d(\lambda, 0^+)$, $W/m^2/nm$)를 측정한다. 현장관측 자료인 3가지 측정량과 Eq. 1로 산출된 양을 이용하여 위성영상과의 원격반사도(R_{rs}) 비교를 수행한다(Mobley, 1999). 이때, Fr은 프레넬 상수를 의미한다.

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda) - (L_{sky}(\lambda) \times F_r)}{E_d(\lambda, 0^+)} (sr^{-1}) \quad (1)$$

현장 관측 자료를 이용한 위성 영상의 검증 작업에 있어서, 현장 관측 자료 오차는 검보정 연구의 정확성과 직접적인 연관되어 있다. 선박의 흔들림 등으로 측정 시마다 달라지는 각도 오차, 태양광반사(Sunglint)로부터 발생하는 오차 등 측정 오차와 기기 자체의 측정 불확도 등의 오차가 혼재되어 있다(Mobley, 1999). 현장 관측에서 발생하는 무작위적인 오차(Random error)는 배제하더라도, 종속가능한 기기 오차(Sensor Calibration error)는 현장 관측 전후의 현장관측 기기의 검교정을 통해 확인할 수 있으므로, 이와 같은 오차 보정을 통하여 검보정 활동의 정확성 향상이 가능하다. 특히, 분광 광도계(e.g. 항공용 다분광센서, 휴대용 센서 등)는 관측 시간, 환경 등에 민감하게 반응하고, 사용 수명에 따른 영향, 그리고 기기 내부의 세부 장비 틀어짐 등에 따른 검출기의 성능 저하도 발생하기 때문에 정기적인 검교정이 필수적이다(Bassani *et al.*, 2006; Gege *et al.*, 2009). 하지만, 국내 기기 검교정 환경 상, 분광 광도계의 정기적인 검교정은 수년에 한번 꼴로 보통 국외의 센서 업체에서 수행하는 실정이며, 이에 따른 시간과 비용이 소요되고 있다. 또한, 정기적인 검교정을 수행한다고 하더라도, 매 현장 관측마다의 분광 광도계의 특성을 달라지기에 더 짧은 주기의 기기의 특성 분석이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 실험실 내 보정, 다른 기기와의 교차 보정 등 상대적 검보정 기술이 개발되고 있다. 독일항공우주센터(German Aerospace Center, DLR)에서는 항공용 영상 분광광도계의 기기 검교정을 위한 실험실을 구축하고

(Gege *et al.*, 2009), 적분구와 관측환경을 고려한 상대적 검보정 모델이 현장관측용 분광광도계에 적용되고 있다(Zhang *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2013).

효과적인 분광 광도계의 성능 및 특성 분석과 매 현장 관측 시마다 동일한 성능 유지를 통해 검보정의 신뢰도를 향상시키기 위하여, 해양위성센터에서는 Analytical Spectral Devices (ASD)사의 FieldSpec3과 같은 현장 관측 장비에 대해 NIST에서 인증된 광원과 표준 분광 광도계를 이용하여 각각의 현장 관측마다 기기의 성능을 측정하고 상대적 검교정을 수행하고 있다. 더불어 GOCI 영상 자료 검보정을 위한 현장 관측 자료와의 비교 연구도 수행하고 있으나, 본 논문에서는 해양위성센터에 구축된 광학 실험실과 현장관측 분광광도계의 상대적 복사 검교정 방법에 대해서 중점적으로 소개하고자 한다. 논문의 구성은 해양위성센터에 구축된 상대 검교정 시스템을 2장에서 소개하고, 3장에서는 구축된 시스템을 이용한 상대적 검교정 방법과 수행절차, 그리고 현재까지 수행된 초기 검교정 현황을 설명한 후, 마지막으로 4장에서 상대적 검교정 방법의 의의와 향후 연구 수행 계획에 대해 논하였다.

2. 상대 검교정 시스템 개발

1) KOSC 광학 검교정 실험실 구축

2012년 3월 해양위성센터는 센터 내 1층에 가로 3.6 m, 세로 8.9 m의 청정 실험실 공간(9.8평)과 실험을 준비하는 전실(6평)을 구축하였다. 광학 검교정 실험의 특성상 주변 빛의 영향을 최소화하기 위하여 실험실 공간은 검은 색 무반사 페인트를 사용하여 벽체와 천정을 구성하였고, 먼지 등 기타 이물질을 제거하기 위하여 무광 전도성 타일로 밀면을 완성하였다. 또한 청정도 100,000 Class의 ACU 항온항습기를 전실에 설치하여 덕트 형태(천정과 벽면을 통해 먼지 흡입 및 온습도 조절)로 온도 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 와 습도 $50 \pm 10\%$ 를 유지함으로써 정밀도 높은 실험 환경 유지할 수 있도록 설계하였다. 더불어 상대 검교정 실험을 위한 표준광원, 표준 분광광도계 등 각종 실험 장비를 진동이 없고 일정한 실험 환경에 설치할 목적으로 편평도 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 급의 무진동 광학 테이블($3600 \times 1500 \times 800 \text{ mm}^3$)을 실험실 내부에 설치하였다(Fig. 2).

Fig. 2. Optical laboratory in KOSC for radiometric calibration. (a) Optical laboratory overview and cleaning system. (b) Environmental test of temperature and humidity.

Fig. 3. NIST traceable calibration system composed with integrating sphere for a standard light source and a standard spectrometer.

2) 상대 검교정 시스템 구축

구축된 검교정 광학 실험실 내 현장관측용 분광광도

계의 상대적 검교정을 위하여 NIST 인증을 받은 정밀도 높은 표준 광원과 표준 분광광도계를 중심으로 검교정 시스템을 개발하였다(Fig. 3).

Table 1에서 보듯이, 98% 이상의 균일한 광속을 가진 20인치 LabSphere사 적분구 USS-2000S 모델을 표준 광원으로 사용하였다. 이 표준 광원은 분광광도계뿐만 아니라 전하결합소자(Charge-coupled device, CCD) 또는 발광다이오드(Light emitting diode, LED) 등 여러 분야의 광학 성능을 분석하는데 기준으로 사용되는 장비이다. 해양위성센터 실험실에 구비된 표준 광원은 기본적으로 4개의 할로겐 램프를 사용하고, 광량 조절이 가능한 1개의 램프가 포함되어 있다. 이를 통해 태양광과 유사한 스펙트럼 및 광량을 구현함으로써 실제 현장관측 시 사용되는 광원의 특성을 고려할 수 있다.

표준 분광광도계(MCPD-9800)는 표준 광원으로부터

Table 1. The specification of a standard light source (USS-2000S, LabSphere)

Specification	
Luminance Range ($\times 1,000 \text{ cd/m}^2$)	0 - 18
Peak Radiance ($\text{mW/cm}^2\text{-sr-}\mu\text{m}$)	55 at $0.9 \mu\text{m}$
Color temperature	3000K
Sphere Diameter	50 cm
Exit Port	20 cm
Lamp Assembly Power	Qty 3, 35 W / Qty 1, 100 W
Current Stability	$3.07 \text{ A} \pm 0.1\% / 8.33 \text{ A} \pm 0.1\%$
Sphere Dimension ($W \times D \times H$)	$61 \times 47 \times 60 \text{ cm}$
Rack Dimension ($W \times D \times H$)	$50 \times 55 \times 56 \text{ cm}$

Table 2. The specification of a standard spectrometer (MCPD-9800, Photal)

Specification	
Detector	TE Cooled CCD(512CH)
Spectroscope	Brazed Holographic Type, $F=3$, $f=85.8 \text{ mm}$
Spectral range	360-1100 nm
Resolution	1.6 nm
Integration time	5 ms - 20 s
ND Filter	ND1, ND2
Wavelength accuracy	$\pm 0.3 \text{ nm}$
Optical Input	Quartz $\phi 12 \text{ mm}$, 2 m long

발광되는 빛을 광섬유(Optical fiber)를 통해 분광기로 유도하고, CCD 센서로 검출하여, 데이터처리장치로 각종 데이터를 변환하는 범용시스템 구성을 가지는 분광 광도계다. 가시광 영역 (360–1100 nm)에서 1.6 nm 간격으로 측정할 수 있는 분광해상도가 높은 장비이며, 항시 검

출기의 온도를 유지하여 측정 오차를 최소화 하는 장점을 가지고 있다. 또한 광섬유 재질로 전자기 절연성이 높아 내부에서 광속의 손실을 최소화 할 수 있는 석영을 사용함으로써 그 신뢰도를 높였다. 해양위성센터 실험실에 구축하면서 NIST 인증을 수행하였고, 그 표준 보정 데이터를 주기적으로 유지보수를 수행하고 있다.

크게 위의 두 가지 시스템을 토대로 상대적 검교정 시스템을 구현하였으며, 실제 실험 환경은 Fig. 4와 같이 표준 광원 앞에 현장관측용 분광광도계와 그 광섬유를 정렬하기 위한 시스템을 위치하여 측정을 수행한다. 측정된 자료는 실험실 내 모니터링 시스템을 통해 일차적으로 복사휘도 값 변환 및 측정 광량의 추세 확인 등을 수행하여 매 실험마다 산출된 결과 값을 곧바로 확인할 수 있도록 환경을 설정하였다.

3. 상대 검교정 실험 결과

1) 상대 검교정 측정 대상: 현장관측용 분광광도계

해양위성센터에서 사용하는 현장관측용 분광광도계 FieldSpec3는 총 3가지 종류로써, 단채널(Single) 분광광도계 2대(No. 16031, No. 16395)와 쌍채널(Dual) 분광광도계 1대(No. 9109)이다. No. 16395와 No. 9109는 가시광파장대 (350-1050 nm)를 측정하며, No. 16031의 경우는 근적외선 영역인 2500 nm 까지 측정이 가능하다. 각각의 분광광도계의 분광 해상도는 1.4 nm와 2.0 nm이며, 광섬유를 통하여 집광을 한다. 광섬유의 입사 화각은

Fig. 4. (a) Experiment set-up of relative radiometric calibration system. (b) The initial data processing in laboratory.

25°이며, 복사조도(Irradiance) 값을 측정할 때에는 Remote Cosine Receptor (RCR) 장비를 앞쪽에 씌워 사용한다. 쌍채널 분광광도계는 복사휘도를 측정할 때의 광섬유(Bare tip)와 RCR 장비를 씌운 광섬유를 이용하여 복사조도를 동시에 측정을 한다.

2) 실험 절차 및 데이터 처리

상대 검교정 실험을 위하여 안정적인 측정 자료 획득을 위하여 다음과 같이 실험을 진행하였다.

- (1) 실험실의 온습도를 확인하고, 측정 장비들의 전원 등을 점검한다.
- (2) 표준 광원의 안정도를 높이기 위하여 적분구를 약 1시간 정도 작동하여 예열을 시킨다.
- (3) 표준 광원에 접속된 표준 분광광도계를 통해 표준 광원의 복사휘도(Radiance) 값을 10회 이상 측정하여 그 오차가 1% 이내로 들어오는 것을 확인한다.
- (4) 표준 광원의 10 cm 앞쪽에 정렬 구조물을 설치하고, 현장관측용 분광광도계의 광섬유를 끼이지 않은 상태에서 고정 시킨다.
- (5) 현장관측용 분광광도계의 측정 광량을 최적화 하여 자료 처리가 용이하도록 설정을 한다.
- (6) 표준 분광광도계와 현장관측용 분광광도계로 동시에 표준 광원의 복사휘도 값을 측정한다.
- (7) 복사조도(Irradiance) 값 측정 시에는 RCR 장비를 현장관측용 분광광도계의 광섬유 앞 쪽에 끼우고, 정렬 구조물의 V자형 홈과 일치시킨다.

- (8) 복사휘도 측정과 마찬가지로 두 장비로 동시에 표준 광원의 복사조도 값을 측정한다.

매 측정마다 동일한 환경에서 상대 검교정 실험을 수행하는 것이 중요하며, 측정을 통해 획득된 Digital Number (DN) 값 형태의 원시자료(Raw data)를 복사휘도와 복사조도로 환산하고 측정된 현장관측 자료를 보정하기 위하여 Fig. 5와 같은 순서로 데이터 처리를 수행한다.

- (1) 측정한 분광광도계의 측정자료를 ASD사의 ViewSpecPro™ 프로그램을 이용하여 복사휘도와 복사조도 값으로 환산한다(Fig. 5a).
- (2) 현장관측 전후의 실험실에서 측정된 분광광도계와 표준 분광광도계의 자료를 환산하고, 산술평균 값을 추출한다(Fig. 5b).
- (3) 각 파장별 보정상수를 $G = (\text{표준 분광광도계의 측정치}) / (\text{현장관측용 분광 광도계의 측정치})$ 로 정의, 도출한다(Fig. 5b).
- (4) 현장 관측 자료 값에 보정상수 G 를 Fig. 5b의 식과 같이 보정한다.
- (5) 보정된 해수수출광량($L_w(\lambda)$), 대기 복사휘도($L_{sky}(\lambda)$), 하향복사조도($E_d(\lambda, 0+)$) 값을 이용하여 원격반사도(R_{rs}), 정규 해수수출광량(nL_w) 등 해석 산출물의 정량적인 값을 계산한다.

3) 상대 검교정 계수 산출 결과

가장 먼저 앞에서 설명한 현장관측장비의 상대적 검

Fig. 5. Data calibration pipe-line.

Fig. 6. Spectral uncertainty analysis of reference light source and spectrometer. (a) Radiance difference, (b) Relative difference of calibration system at each measurement experiment for spectral bands.

교정을 위한 신뢰도 분석의 일환으로, 구축된 검교정 시스템의 측정 불확도를 확인하였다. 검교정 시스템은 표준 광원과 표준 분광광도계로 이루어져 있으며, 구축 후 약 1여년 간 측정한 실험 결과의 동일 환경에서의 복사 휘도 차이를 확인하였다. Fig. 6은 2013년 4월부터 2014년 1월까지 총 6차례의 검교정 시스템의 측정 테스트 결과를 정리한 그림으로, 각 점들은 측정 실험마다의 데이터에 대하여 산술 평균치 대비 절대적(a), 상대적(b) 차이를 의미한다. 짙은 녹색부터 회색, 밝은 녹색 순으로 파장별 측정 자료의 오차 범위를 각각 1 σ 부터 3 σ 순으로 통계적으로 분석하였다. Fig. 6a는 파장마다 산술 평균값 대비 각 측정의 절대 복사휘도의 차이가 통계적으로 2 σ 값 기준 ± 0.01 (W/m²/nm/sr) 이내의 차이를 보이고 있다. 이 값을 Fig. 6b에서와 같이 각 파장별로 기준 복사휘도에 대해 백분율로 나타내면 500 nm 이후 파장에서는 2 σ 값 기준 $\pm 1.51\%$ 이내의 차이를 보이고 있고, 파란

파장 영역대역인 350 nm 부터 500 nm 에서는 최대 $\pm 2.29\%$ 까지의 차이를 보이고 있다. 이 결과는 98%의 광속 균질성을 가진 표준 광원과 표준 분광광도계의 측정 불확도가 중첩된 결과이며, 상대적으로 낮은 광량 (0.2 (W/m²/nm/sr) 이하)을 보이는 파란 파장 영역대에서 그 영향이 더 크게 나타나고 있다.

다음으로 현장관측에 사용되는 분광 광도계의 시간에 따른 광학적 특성 변화를 검교정 시스템의 측정을 통해 알아보았다. Fig. 7은 총 3대의 분광 광도계에 대한 광학 성능의 측정 변화를 보여 주고 있다. Fig. 7a와 7b는 No. 9109의 복사휘도와 복사조도의 측정치를 나타내며, Fig. 7c와 7d, 그리고 Fig. 7e와 7f는 각각 No. 16031과 No. 16395 기기에 대한 결과이다. 측정 자료들의 산술 평균값을 기준으로 각 측정치와의 변화 정도를 파악하였고, GOCI 센서의 8개 밴드 영역을 기준으로 밴드 별 표준 편차를 산출하였다(Table 3). 그 결과 No. 9109가 3대의

Table 3. Radiance and irradiance variation of in-situ measurement spectrometer according to GOCI spectral bands

Band	No. 9109		No. 16031		No. 16395	
	Radiance (W/m ² /nm/sr)	Irradiance (W/m ² /nm)	Radiance (W/m ² /nm/sr)	Irradiance (W/m ² /nm)	Radiance (W/m ² /nm/sr)	Irradiance (W/m ² /nm)
412	0.0564 $\pm$ 0.0006	0.1893 $\pm$ 0.0096	0.0566 $\pm$ 0.0011	0.1824 $\pm$ 0.0068	0.0593 $\pm$ 0.0025	0.1996 $\pm$ 0.0053
443	0.0941 $\pm$ 0.0005	0.3195 $\pm$ 0.0131	0.0946 $\pm$ 0.0015	0.3122 $\pm$ 0.0091	0.0984 $\pm$ 0.0043	0.3379 $\pm$ 0.0075
490	0.1658 $\pm$ 0.0010	0.5700 $\pm$ 0.0186	0.1678 $\pm$ 0.0023	0.5645 $\pm$ 0.0140	0.1737 $\pm$ 0.0077	0.6041 $\pm$ 0.0129
555	0.2827 $\pm$ 0.0010	0.9800 $\pm$ 0.0255	0.2884 $\pm$ 0.0035	0.9786 $\pm$ 0.0225	0.2971 $\pm$ 0.0131	1.0387 $\pm$ 0.0211
660	0.4590 $\pm$ 0.0012	1.5985 $\pm$ 0.0340	0.4669 $\pm$ 0.0049	1.5982 $\pm$ 0.0349	0.4800 $\pm$ 0.0210	1.6867 $\pm$ 0.0340
680	0.4859 $\pm$ 0.0010	1.6946 $\pm$ 0.0341	0.4943 $\pm$ 0.0050	1.6941 $\pm$ 0.0364	0.5081 $\pm$ 0.0221	1.7871 $\pm$ 0.0359
745	0.5505 $\pm$ 0.0009	1.9277 $\pm$ 0.0347	0.5605 $\pm$ 0.0053	1.9324 $\pm$ 0.0394	0.5769 $\pm$ 0.0244	2.0357 $\pm$ 0.0406
865	0.5817 $\pm$ 0.0013	2.0546 $\pm$ 0.0246	0.5936 $\pm$ 0.0057	2.0543 $\pm$ 0.0363	0.6148 $\pm$ 0.0246	2.1655 $\pm$ 0.0476

Fig. 7. Radiance and irradiance variation of in-situ measurement spectrometers.

Fig. 8. (a) Relative radiometric Calibration gain estimation, (b) calibrated in-situ measurement radiance data.

분광 광도계중 가장 적은 변화를 보였고, 865 nm 파장에서의 복사휘도의 표준 편차는 ± 0.0013 로써, No. 16395의 ± 0.0246 보다 적은 변화를 보여준다. 가장 크게 차이가 나는 No. 9109의 412 nm 파장 영역에서의 복사휘도 값이 최대 5.06% 차이를 보이는 것을 제외하고, 약 1여년간의 정기적인 측정 결과 모든 장비의 전 파장 영역에서 4.41% 이내의 차이를 보이고 있다.

Fig. 6 과 7 과 같이 측정된 표준과 현장관측용 분광광도계의 복사휘도, 복사조도 값을 Fig. 5b 의 계산 과정에 입력하여 각 관측 마다의 보정 계수(G)를 산출하였다. Fig. 8 은 분광광도계(No. 16031)의 현장 자료(목포 지역, 2013년 04월 26 일 13:37부터 13:38까지 9번의 측정자료를 산술평균하여 사용)를 상대적 검교정을 수행한 결과이다. 전체적으로 낮은 복사휘도 값을 보였던 분광광도계의 값을 Fig.8a의 보정 계수(녹색 선)를 이용해 상대적으로 복사휘도 값을 높여 주었다. 파란 파장 영역(400 nm 이하)은 1.2 정도, 평균적으로 약 1.1 정도의 보정 계수가 사용되었다. 파장마다 다른 보정 계수가 적용되어 매 관측 시 동일한 조건으로 현장 관측 스펙트럼 분석이 가능하게 되었다(Fig. 8b).

4. 결론

본 논문은 해색위성의 영상 검보정 정확도 향상을 목적으로 현장관측용 분광광도계의 상대적 검교정 시스템 개발과 그 방법 및 절차에 대하여 논하였다. 현장 관측 전후의 분광광도계에 대해 실험실 내에서 표준 광원과 표준 분광광도계를 이용하여 시간에 따른 성능의 변화량을 측정하고, 검교정 계수를 산출하여 파장별 복사휘도와 복사조도 값을 보정하는 방식을 이용하였다. 해양위성센터에서 사용하는 현장관측용 분광광도계로 ASD사의 FieldSpec3 장비 3종류에 대하여 실험을 진행하였으며, 해색 산출물과 연관성이 많은 파란 파장 영역(350–500 nm)에서의 복사 휘도의 차이가 크게 나타나는 등의 시간에 따른 성능 변화를 확인하였고, 이는 정기적인 검교정의 필요성을 나타낸다고 하겠다. 이러한 초기 결과는 현장 자료의 정확도 향상에 기여할 수 있을 것으로 보이며, 상대적 검교정 시스템 개발은 기기 자체의 정밀한 절대 교정에 비해 성능 검증과 상대적 검교정

할 수 있다는 수시성과 편의성에서 장점을 갖는다고 판단된다.

향후 연구로는 현장관측 장비의 복사 휘도의 부정확도를 줄일 수 있는 방안을 마련하는 것과 더불어 궁극적으로 이 연구의 결과를 보정된 현장 자료와 영상 자료를 비교 분석함으로써, 해색 산출 알고리즘의 정확도 향상에 기여하는 것이다. 또한, 정기적인 실험과 광학 소프트웨어를 통한 수치모사를 통해 검교정 시스템의 부정확도를 지속적으로 확인하고, 안정성을 확보함으로써 현장관측용 분광광도계의 종류 별로 보정 계수를 산출하는 방법을 개선하여야 한다. 중장기적으로는 해양위성센터의 광학 보정 실험실의 공인시험기관 인증을 추진하여 산학연 협력 기관에서 사용 중인 현장관측용 분광광도계에도 서비스를 수행할 계획이다. 이러한 과정은 향후 국내의 해색 원격탐사 연구의 질적 향상에 기여할 것으로 예상된다.

사 사

본 연구는 해양수산부 연구개발사업인 “정지궤도 해색위성 활용연구(2단계)” 사업(PM57640), “해양관측위성 2호 운영기술개발 및 감리” 사업(PM58090)과 한국해양과학기술원의 기본 연구 사업인 “정지궤도 해양탐색체(GOCI)의 광학성능 수치모사 연구” 사업(PE99241)으로 수행되었습니다.

References

- Bailey, S.W. and P.J. Werdell, 2006. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products, *Remote Sensing of Environment*, 102(1): 12-23.
- Bassani, C., R.M. Cavalli, A. Palombo, S. Pignatti, and F. Madonna, 2006. Laboratory activity for a new procedure of MIVIS calibration and relative validation with test data, *Annals of Geophysics*, 49(1): 45-56.
- Hooker, S. and C. McClain, 2000. The calibration and

- validation of SeaWiFS data, *Progress in Oceanography*, 45(3): 427-465.
- Huang, C., L. Zhang, J. Fang, and Q. Tong, 2013. A radiometric calibration model for the field imaging spectrometer system, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 51(4): 2465-2475.
- Gege, P., J. Fries, P. Haschberger, P. Schotz, H. Schwarzer, P. Strobl, B. Suhr, G. Ulbrich, and W.J. Vreeling, 2009. Calibration facility for airborne imaging spectrometers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64: 387-397.
- Lee, M.S., K.A. Park, J.Y. Chung, Y.H. Ahn, and J.E. Moon, 2011. Estimation of Coastal Suspended Sediment Concentration using Satellite Data and Oceanic In-Situ Measurements, *Korean Journal of Remote Sensing*, 27(6): 677-689.
- Mobley, C.D., 1999. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements, *Applied Optics*, 38(36): 7442-7455.
- Moon, J.-E., Y.-J. Park, J.-H. Ryu, J.-K. Choi, J.-H. Ahn, J.-E. Min, Y.-B. Son, S.-J. Lee, H.-J. Han, and Y.-H. Ahn, 2012. Initial validation of GOCI water products against in situ data collected around Korean peninsula for 2010-2011, *Ocean Science Journal*, 47(3): 261-277.
- Richards, J.A. and X. Jia, 1999. *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Springer.
- Schowengerdt, R.A., 2006. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Academic press.
- Zhang, L., C. Huang, T. Wu, F. Zhang, and Q. Tong, 2011. Laboratory calibration of a field imaging spectrometer system. *Sensors*, 11: 2408-2425.