

정지궤도 해색탐재체(GOCI) 자료 검정을 위한 사전연구

유주형*† · 문정언* · 손영백* · 조성익* · 민지은* · 양찬수* · 안유환* · 심재설**

*한국해양연구원 해양위성센터, **한국해양연구원 기후·연안재해연구부

Prelaunch Study of Validation for the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)

Joo-Hyung Ryu*†, Jeong-Eon Moon*, Young Baek Son*, Seongick Cho*,
Jee-Eun Min*, Chan-Su Yang*, Yu-Hwan Ahn*, and Jae-Seol Shim**

*Korea Ocean Satellite Center, Korean Ocean Research & Development Institute (KORDI)

**Climate Change & Coastal Disaster Department, Korean Ocean Research & Development Institute (KORDI)

Abstract : In order to provide quantitative control of the standard products of Geostationary Ocean Color Imager (GOCI), on-board radiometric correction, atmospheric correction, and bio-optical algorithm are obtained continuously by comprehensive and consistent calibration and validation procedures. The calibration/validation for radiometric, atmospheric, and bio-optical data of GOCI uses temperature, salinity, ocean optics, fluorescence, and turbidity data sets from buoy and platform systems, and periodic oceanic environmental data. For calibration and validation of GOCI, we compared radiometric data between in-situ measurement and HyperSAS data installed in the Ieodo ocean research station, and between HyperSAS and SeaWiFS radiance. HyperSAS data were slightly different in *in-situ* radiance and irradiance, but they did not have spectral shift in absorption bands. Although all radiance bands measured between HyperSAS and SeaWiFS had an average 25% error, the 11% absolute error was relatively lower when atmospheric correction bands were omitted. This error is related to the SeaWiFS standard atmospheric correction process. We have to consider and improve this error rate for calibration and validation of GOCI. A reference target site around Dokdo Island was used for studying calibration and validation of GOCI. *In-situ* ocean- and bio-optical data were collected during August and October, 2009. Reflectance spectra around Dokdo Island showed optical characteristic of Case-1 Water. Absorption spectra of chlorophyll, suspended matter, and dissolved organic matter also showed their spectral characteristics. MODIS Aqua-derived chlorophyll-a concentration was well correlated with *in-situ* fluorometer value, which installed in Dokdo buoy. As we strive to solve the problems of radiometric, atmospheric, and bio-optical correction, it is important to be able to progress and improve the future quality of calibration and validation of GOCI.

Key Words : GOCI, KOSC, Validation, Radiometric correction, Atmospheric correction, Bio-optical correction.

요약 : GOCI(Geostationary Ocean Color Imager) 표준자료의 지속적인 품질관리를 위해서는 위성 운용기간 중 궤도상 복사보정, 대기보정 단계를 거쳐야 되며 해수환경 분석 알고리즘에 대한 검보정도 지속적

접수일(2010년 4월 2일), 수정일(1차 : 2010년 4월 15일, 2차 : 4월 18일), 게재확정일(2010년 4월 22일).

† 교신저자: 유주형(jhryu@kordi.re.kr)

으로 이루어져야 한다. GOCI의 복사, 대기, 해양환경 자료에 대한 검보정은 부이나 고정 플랫폼을 이용한 수온, 염분, 해수 광특성, 해광, 및 탁도 관측과, 주기적으로 해양환경 자료 수집을 통하여 실시한다. 이를 위하여 동중국해에 위치하고 있는 이어도 종합해양과학기지에 설치된 광학 관측 장비와 현장 관측의 복사자료를 상호 비교해 보았으며, GOCI 표준자료의 검정에 앞서 SeaWiFS 복사량과 비교하여 검정하였다. 해수출 광량은 현장관측에서 얻어진 광과 광량과는 약간의 차이를 보였지만, 흡광영역이 매우 잘 일치하고 있으며 스펙트럴 이동은 없는 것으로 판단된다. 이어도 종합해양과학기지의 분광측정기와 SeaWiFS의 전 밴드에서 얻어진 해수출 광량을 비교한 결과 평균 25% 정도의 에러가 발생했지만, 대기보정 밴드를 제외하면 절대오차가 11% 정도로 상당히 낮아진다. 이것은 SeaWiFS 표준 대기보정 방법의 문제점으로 GOCI 검보정 연구에서 고려되어 보완 되어야 할 것으로 판단된다. 이와 더불어 독도 지역의 표준 관측치(Reference Target Site) 구축을 통한 검보정 연구를 위하여, 독도 주변 해수의 광 특성과 해양환경 자료는 2009년 8월과 2009년 10월 2차례에 걸쳐서 현장관측을 실시하였다. 독도 주변 해역의 해양 광 특성은 원경반사도의 스펙트럼 형태를 기준으로 Case-1 Water 성향이 강한 해수에서 나타나는 특성과 매우 유사하였다. 식물플랑크톤, 부유물질, 용존유기물의 흡광계수 스펙트럼의 형태들은 대체적으로 각 성분별 흡광 스펙트럼 특성을 잘 보여주었다. 또한 MODIS Aqua로부터 산출된 엽록소 농도와 현장관측을 통한 검증에서 위성자료 값들은 잘 일치한다. 위와 같이 현재 진행되고 있는 GOCI 검보정 연구를 통해서 복사, 대기, 해양환경 알고리즘에 대한 문제점이 도출되었고, 차후 검보정 계획에 반영하여 이 부분들에 대한 개선 및 보완이 이루어질 것으로 판단된다.

1. 서론

미국 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에 의해 해양에서의 pigment 추정을 목적으로 세계 최초의 해상 센서인 Coastal Zone Color Scanner(CZCS)가 Nimbus-7 위성에 탑재되어 1978년 10월에 발사되었다. CZCS는 최초의 해상센서라는 점에서는 성공하였으나, 하루에 2시간의 제한적인 관측 시간과 1년의 위성체 관측수명, 그리고 level-1 Radiance로부터 유도된 level-2 자료는 10% 이내 자료처리 기준 등 매우 제한적인 목표를 갖고 있었다. 하지만 해양연구 그룹들은 CZCS를 계기로 해상위성에서의 검보정, 대기보정, Bio-optical 알고리즘, 자료처리와 자료 접근 등의 해상원격탐사 시스템에 대한 전반적인 요소들의 중요성을 파악하였으며, 많은 교훈을 얻게 되었다(Hooker and McClain, 2000; D'Ortenzio et al., 2002; Hyde et al., 2007).

이를 바탕으로 개발된 Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor(SeaWiFS)는 1997년 9월 발사되어 현재까지 양질의 자료를 제공하고 있으며, 세계적으로 가장 성공적인 해상센서로 평가받고 있다. 이와 같은 SeaWiFS의 성공 원인으로서는 하드웨어적으로 우수한 센서의 개발은 물론 검보정(Cal/Val) 팀의 다양한 노력

의 결과이다. SeaWiFS Cal/Val 사업은 발사 전후에 위성체, 대기, 바다표층과 수중 그리고 실험실과 자료처리 등의 모든 분야에서 이루어졌다. 이들의 목표는 절대오차 5% 이내의 해수 복사량(Water Leaving Radiance) 자료를 생산하는 것과 엽록소(Chlorophyll-a)의 농도가 0.05-50 mg/m³ 지역에서 ±35% 이하의 엽록소 분석 자료를 생산하는 것이다. 이를 위하여 하와이 부근에 시계열 현장조사 자료를 획득하기 위하여 Marine Optical Buoy(MOBY)를 운영하고 있으며, 관련 자료 획득을 위한 SeaWiFS Bio-optical Archive and Storage System(SeaBASS), 현장자료 취득 방법론을 정립하기 위한 SeaWiFS Ocean Optics Protocol(SOOP), 현장 검보정 기기의 상호 비교와 인력 교육을 위하여 매년 실시하는 SeaWiFS Intercalibration Round-Robin Experiments(SIRREXs), 미국립표준 연구실에서의 직접비교를 위한 SeaWiFS Transfer Radiometer(SXR), 현장관측 기기 보정의 시간적 안정성을 모니터링하기 위한 SeaWiFS Quality Monitor(SQM) 등의 사업을 해오고 있다. 또한 전세계 해역을 대상으로 대기보정과 해수 분석 알고리즘에 대한 다양한 현장조사와 심포지움 등을 지원하고 있다(Hooker and McClain, 2000).

미국 이외의 해상위성 선도국에서도 검보정을 위하

여 많은 노력을 기울이고 있다. 일본 해색위성인 Ocean Color and Temperature Scanner(OCTS)의 보정을 위하여 일본 National Space and Development Agency(NASDA)에서 개발한 Yamato Bank Optical Mooring(YBOM), 영국의 Plymouth Marine Bio-Optical Data Buoy(PlyMBODY), 유럽의 해색센서인 Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument(MERIS) 검보정을 위한 BOUSSOLE 부이 등이 있다. 계류 시스템은 한 정점에 대해서 시계열 자료를 얻을 수 있으며, 수중에서의 프로파일 자료의 수집이 가능하다는 장점이 있어 맑은 해역에서는 효과적이거나, 물속에 잠긴 광학기기의 표면에 생물고착물 관리를 철저히 하여야 한다. 따라서 선박을 이용한 관측과 계류 시스템의 대안으로는 바다에 직접 고정 플랫폼을 세워 자동관측 해수분광측정기를 설치하여 자료를 수집하고 있다. 이의 장점은 센서의 안정성, 기기 전력의 안정성, 광학기기 표면의 부착물 관리, 기기의 유지/보수의 용이성 등이다. 미국과 이태리가 공동으로 해색센서의 검보정을 위하여 유럽에 Coastal Atmosphere and Sea Time-Series(CoASTS)라는 캠페인을 통해 해양 플랫폼에서의 기기 설치 및 활용에 대한 많은 연구가 보고되었다(Zibordi *et al.*, 1999; Hooker *et al.*, 2002; Hooker and Morel, 2003; Zibordi *et al.*, 2004; Hooker and Zibordi, 2005; Zibordi *et al.*, 2009). 또한, AEROSOL ROBOTIC NETWORK(AERONET)의 일환으로 해색을 위한 AERONET-OC(Ocean Color)가 구성되었으며, Zibordi *et al.*(2009)은 이 중 Aqua Alta Oceanographic Tower(AAOT), Gustaf Dalen Lighthouse Tower(GDLT)와 북발틱해의 Helsinki Lighthouse Tower(HLT)에 설치된 광학기기 자료를 이용한 검정에 대한 논문을 발표하였다.

하지만, 기존의 극궤도 해색위성들과는 달리 정지궤도 해색센서(GOCI, Geostationary Ocean Color Imager)는 하루에 8번 관측으로 인하여 시간별로 태양-지구-위성간의 위치가 계속적으로 바뀌게 됨으로 광특성 및 양방향성 광반사 분포함수(BRDF, Bidirectional Reflectance Distribution Function)에 대한 보정이 필요하다. 그리고 GOCI는 2차원적인 frame-capture 방식으로 16개의 슬롯을 관측하게 됨으로 첫 슬롯과 16번째 슬롯간의 관측 시간 차이 때문에 빠르게 이동하는

구름이나 조류의 영향에 대한 문제가 발생 할 수 있다. 다른 문제점은 GOCI의 관측 영역 지역에는 북서계절풍의 영향으로 해수 광특성의 변화가 심한 지역이므로 (Case-1과 Case-2 Water 공존) 기존의 극궤도용 해수 환경 분석 알고리즘을 적용하기는 어렵다. 따라서 GOCI가 실제 한반도 지역에 특화되어 해양환경분석 연구에 신뢰성 있는 자료로 활용하기 위해서는, 지속적으로 센서의 광학적인 검보정이 수행되고, 위성자료로부터 분석된 해양환경 자료는 주기적으로 선박현장 관측 자료와 비교/분석을 통한 자료의 질을 높이는 과정이 병행되어야 할 것이다(Hooker and McClain, 2000; 유, 2002; Hyde *et al.*, 2007; 한국해양연구원, 2008). 따라서 기존의 극궤도 위성에서 사용되었던 검정 방법에 대한 기술적 검토를 바탕으로 GOCI에 적합한 개선된 접근이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 해색위성의 해수출광량 검정을 위해 이어도 종합해양과학기지에 설치된 분광측정기 자료를 이용하여 SeaWiFS의 대기보정 결과를 검정하고, 기준참고점으로 활용하기 위한 현장조사 결과를 정리하였다. 또한 독도부이에 설치된 형광센서 자료와 SeaWiFS 클로로필 농도 값의 검정을 실시하였다. 마지막으로 GOCI 자료의 검보정에 대한 계획에 대해서 소개를 하고자 한다.

2. 자료 및 방법

1) 이어도 종합해양과학기지

2003년 6월 준공된 이어도 종합해양과학기지는 동중국해 중앙에 있는 수중 암초인 이어도에 세워진 종합적인 해양과학기지이다. 제주도 남쪽 마라도에서 서남방으로 149 km, 일본 도리사마(鳥島)에서 서쪽으로 276 km, 중국의 통타오(董島)로부터 북동쪽으로 247 km 거리에 위치하고 있다(Fig. 1a & 1b).

이어도 종합해양과학기지에 설치된 HyperSAS OCR-3000(Satlantic Co.) 해수분광측정 시스템의 구성은 수괴로부터 해수표면을 통과하여 나오는 수출복사량(L_w , Water Leaving Radiance)과 대기로부터 나오는 대기복사량(L_{sky} , Sky Radiance)을 각각 측정하는

Table 1. Platform and buoy system for GOCI Cal/Val

No.	Platform/Buoy	Instrument	Measurement	Water type
1	Ieodo Ocean Research Station	HyperSAS OCR-3000 (Satlantic Co.)	Ed, Lsky, LwT	Case-1 and Case-2
2	Gagecho Ocean Research Station	Aeronet-OC (Cimel Co.)	Ed, Lsky, LwT	Case-2
3	Dokdo Buoy	Fluorometer (WETLabs) Transmissometer (WETLabs)	Chlor-a TSS	Case-1
4	Yellow Sea Buoy	Fluorometer (WETLabs) Transmissometer (WETLabs)	Chlor-a TSS	Case-1
5	Eocheongdo Buoy	Fluorometer (WETLabs) Transmissometer (WETLabs)	Chlor-a TSS	Case-1 & Case-2

(Ed: downwelling irradiance, Lsky: sky radiance, LwT: total water leaving radiance, TSS: total suspended sediment)

MiniSpec-R 분광기 2개와 방향에 관계없이 해수로 입사되는 하향광량을 측정하는 MiniSpec-I 분광기 1개로 구성되어 있다. MiniSpec-R과 MiniSpec-I 분광기는 256개의 채널, 300-1200nm의 측정범위와 3.3nm의 분광해상도를 가지고 있으며, MiniSpec-R의 Field of View(FOV)는 11.5°이다(Table 1). 이외에도 열적외선을 이용하여 해수 표면의 온도를 측정하는 IR센서, 위성으로부터 위치정보를 수신하는 GPS와 이들 모든 자료들을 정해진 스케줄에 따라 운용하고 저장하는 콘트롤 박스인 STOR-X가 포함되어 있다.

HyperSAS 시스템의 운용은 매일 오전 8시부터 오후 7시까지 1시간 간격으로 매 시간 1분 동안 관측된다. 매시간 첫 관측 시 워밍업으로 3회 관측을 실시하고 관측시간 사이에 3-4번 단일 관측한다. 1초에 2-4번 관측되므로 1분 동안 최소 120회에서 최대 240회까지 관측된다. 관측항목은 시간과 위치, 해수로 입사되는 하향 방사도(E_d , Downwelling Irradiance), 대기로부터 나오는 대기복사도, 해수 수괴로부터 해수표면을 통과하여 나오는 총수출복사량(L_{wT} , Total Water Leaving Radiance), IR센서를 통해 측정된 해수 표면 온도(SST, Sea Surface Temperature) 등이다(Table 1).

2) 가거초 종합해양과학기지

2009년 10월 준공된 가거초 종합해양과학기지는 가거도 서측 47km에 위치하고 있으며 수심 15m의 수중 함초에 세워진 우리나라 두 번째 종합해양과학기지이다(Fig. 1a & 1c). 이곳에는 미국 NASA 주도의 국제대기 관측망인 AERONET에서 운영하고 있는 새로운 관측망인 AERONET-OC을 설치하여 해양위성 검보정을 위한 관측을 수행할 계획이다. AERONET-OC는 기존

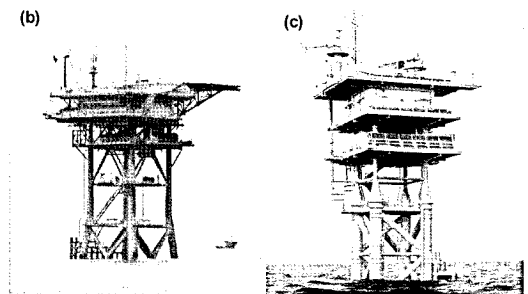
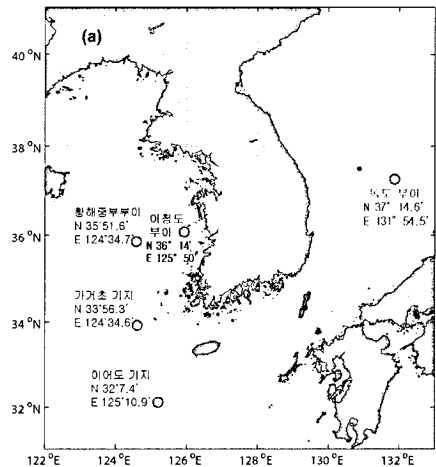


Fig. 1. (a) Location of the ocean research station and buoy for GOCI calibration and validation. (b) The Ieodo and (c) Gagecho ocean research station photo.

관측기기와 동일한 데이터 포맷을 기반으로 데이터 교환 및 공동 기기의 상호 검보정이 가능한 장비로 프랑스 Cimel사에서 개발한 CE-318 Sun-Photometer에 해수 수출광량을 측정 기능을 추가한 CE-318 SeaPRISM Sun-Photometer를 이용하여 관측을 수행한다. 이어서 기지에 설치되어 있는 HyperSAS는 hyperspectral band이지만 AERONET-OC는 9개(412, 440, 500,

550, 675, 870, 936, 1020, 1640nm)의 밴드로 10nm의 분광해상도, 태양과 대기의 FOV는 1.2°를 가진다. AERONET-OC는 센서 본체에 구동모터가 있어서 태양의 위치가 변화여도 태양광을 자동 추적하여 광 측정이 가능하다. 또한 태양전지판 설치는 외부 전원연결 없이 독립적으로 운용이 가능하며, 배터리 및 외부전원과 태양전지판을 통한 충전 기능을 가지고 있다. 시스템의 운용은 GOCI에서 관측되는 시간과 동일하게 1일 8회 관측을 목표로 HyperSAS에서 측정되는 하향방사도, 대기복사량, 그리고 총수출복사량을 측정한다(Table 1).

3) 부이

현재 운용되고 있는 해상 관측용 부이는 독도, 황해중부, 그리고 어청도에 설치되어 운용중이다(Fig. 1a, Table 1). Table 1은 기본적인 해양관측 항목을 기술하고 있지만 이외에도 기상 및 해양에 관련된 관측 장비들이 부착되어 있다. 먼저 독도부이는 기상관측 관련하여 풍향, 풍속, 온도, 습도, 및 기압을 측정하고, 해양관측은 표층수온, 수심별 수온 및 염분도, 파랑, 유속, 그리고 해양환경 자료인 클로로필 및 탁도를 측정하는 광센서가 부착되어 있다. 황해중부 부이는 기상관측 관련하여 독도부이와 유사하지만 강우량, 단파 및 장파 복사, 그리고 시정을 관측할 수 있는 센서가 부착되어 있고, 해양관측은 수온 및 염분도, 파랑, 해류 그리고 해양환경 자료인 pH, DO, 탁도, 및 클로로필 측정이 가능하다. 어청도 부이는 기상관측의 기본적인 요소인 풍향, 풍속, 대기온도, 및 습도를 측정하고, 해양관측은 파고 및 해류를 측정하는 장비가 부착되어 있다. 현재 해양환경 자료 습득을 위하여 탁도 및 클로로필 센서 부착을 추진 중이다.

4) 선박

해수 표면의 광특성 측정에는 휴대용인 ASD (Analytical Spectral Device)사의 Fieldspec Pro Dual VNIR spectroradiometer을 이용한다. 해수 중에서 광특성을 측정하기 위하여 TriOS사의 underwater spectroradiometer system을 이용하여 하향방사도, 상향방사도(E_u , Upwelling Irradiance), 그리고 상향복사량(L_u , Upwelling Radiance)을 측정한다. 이 장비와 같이 연동되는 WETLabs사의 AC-S system은 수층의 고유광특성(IOP, Inherent Optical Property)을 측정

한다. 그 외에도 형광 및 탁도 센서가 부착된 장비를 이용하여 현장관측이나 부이 계류시스템과 연계하여 온도, 염분도, 엽록소 및 탁도 농도를 자동 측정한다(문 외, 2010).

한국해양연구원 보유 연구조사선 및 임차어선을 이용하여 다음과 같은 해수환경 정보를 분석한다. 엽록소 농도($\langle chl \rangle$, Chlorophyll Concentration), 부유물질 농도(SS, Suspended Sediment Concentration), 식물플랑크톤에 의한 흡광계수(a_{ph} , Absorption Coefficient for Phytoplankton), 부유퇴적물에 의한 흡광계수(a_{ss} , Absorption Coefficient for Suspended Solid particles), 용존유기물에 의한 흡광계수(a_{dom} , Absorption Coefficient for Dissolved Organic Matter), 유기탄소(POC, Particulate Organic Carbon), 온도, 염분도 및 secchi disk을 이용한 탁도 측정 등이 있다(문 외, 2010).

5) 위성자료

본 연구에 사용된 SeaWiFS와 MODIS 자료는 한국해양연구원에서 1998년부터 현재까지 수신한 자료들 중에서 이어도 종합해양과학기지의 해수분광기와 독도 부이에서 측정된 자료들을 선별하였다. SeaWiFS와 MODIS 위성자료의 처리는 SeaWiFS Data Analysis System(SeaDAS) 소프트웨어를 이용하여 위성에서 수신한 Level 0 자료를 센서, 지형과 복사 보정 처리하여 Level 1A 자료를 생산하고, 생산된 Level 1A 자료를 대기 보정과 각종 분석 알고리즘을 적용함으로써 Level 2 자료를 생산하였다(McClain *et al.*, 2004). Level 2 자료들 중 밴드별 대기보정된 수출복사량, 원격반사도(R_{rs} , Remot Sensing Reflectance) 및 위성에서 추정된 엽록소 농도 자료들을 이용하여 이어도 종합해양과학기지에 설치된 HyperSAS 해수분광 측정자료와 비교하였고, 독도 부이에서 근처에서 관측된 엽록소 농도와 비교 검증하였다.

3. 연구 결과

1) 이어도 종합해양과학기지 자료를 이용한 SeaWiFS 해수출광량 검증

2003년 10월부터 2004년 7월까지 이어도 종합해양과

학기지에서 측정된 복사량 자료와 시기가 일치하는 SeaWiFS의 해수출복사량을 비교함으로써 SeaDAS를 이용한 SeaWiFS 표준 대기보정 알고리즘을 검증하였다. 맑은 날 얻어진 21개의 매칭 자료 중 이어도 종합해양과학기지에서도 측정된 분광 신호가 불안정한 6개의 자료는 제외하였다. Fig. 2는 15개 자료의 이어도 종합해양과학기지에 설치된 분광기인 HyperSAS와 SeaWiFS의 수출복사량을 밴드별로 비교한 것이다. 이러한 분포의 경향성을 D'Ortenzio *et al.*(2002)에서의 에러 퍼센트를 이용, 수치화하여 나타냈으며 Table 2에 정리하였다.

$$%E = 100 \left| \frac{C_{HyperSAS} - C_{SeaWiFS}}{C_{HyperSAS}} \right|$$

여기서, $C_{HyperSAS}$ 와 $C_{SeaWiFS}$ 는 각각 HyperSAS와 SeaWiFS에서 산출된 밴드별 수출복사량 값이다.

Fig. 2와 Table 2에서 보면, SeaWiFS 밴드 1과 2의 중심파장대인 412와 443nm 에서는 HyperSAS에서 측정된 값이 위성 값보다 높게 나타났으며, 에러 퍼센트도 각각 20과 12% 정도의 비교적 높은 값을 보였다. 이는 단파장에서의 높은 산란 특성에 의한 것으로 생각되며, Yoo *et al.*(2000)의 연구에서 단파장대에서 검정 결과가 안 좋은 것은 SeaDAS의 에어로졸 흡광 모델의 문제로 판단한 바 있다. SeaWiFS 밴드 3-5까지에 해당하는 490, 510과 555nm 영역에서는 에러 퍼센트가 7-9% 정도로 단파장대에 비해 상당히 낮게 나타났지만, SeaWiFS 수출복사량의 절대오차 5%보다는 비교적 높은 값을 보였다. 그러나 상관계수가 0.92 - 0.94 정도로 상당히 좋은 상관관계를 보였고, 표준편차도 8.5 - 9.2 정도로 대체적으로 만족할만한 수준이라고 생각된다. 또한 수출복사량의 세기도 다른 밴드들에 비해 강하게 나타나는데, 555nm의 상한값들인 두 점들을 제외하

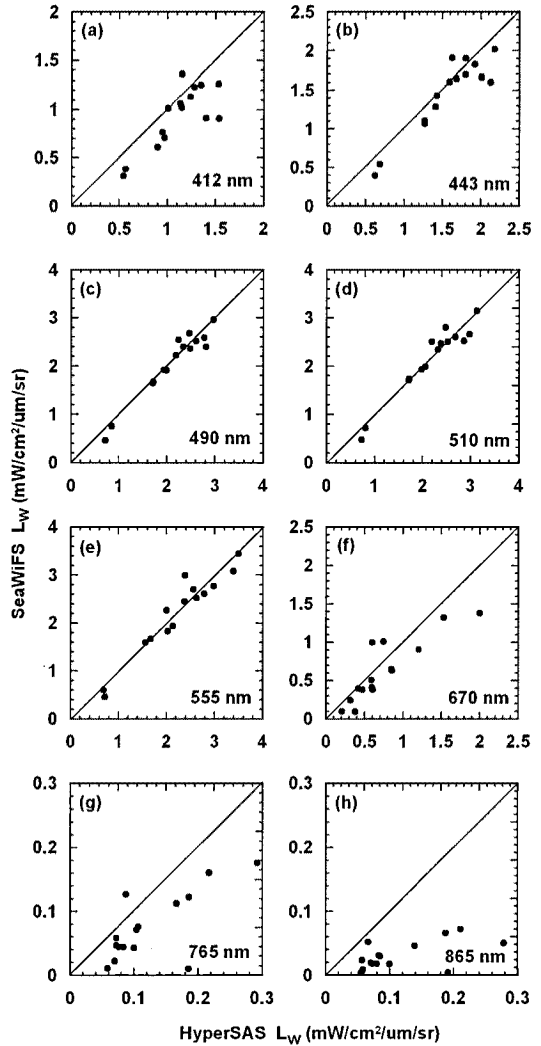


Fig. 2. Comparison between HyperSAS and SeaWiFS water-leaving radiance in each band (a) 412 nm (b) 443 nm (c) 490 nm (d) 510 nm (e) 555 nm (f) 670 nm (g) 765 nm (h) 865 nm.

Table 2. Statistical analysis of HyperSAS and SeaWiFS water-leaving radiance at the leodo Ocean Research Station using 15 data from Oct. 2003 to Jul. 2004.

SeaWiFS Wavelength (nm)	412	443	490	510	555	670	765	865	Total
%E _{min}	0.77	0.24	0.22	0.26	0.10	5.61	19.91	20.57	
<%E>	20.10	12.03	7.60	7.46	9.60	31.97	45.28	70.96	25.63
%E _{max}	42.54	36.60	35.51	34.15	35.85	75.78	94.38	97.75	
%S	13.48	9.75	8.56	8.72	9.24	18.69	20.44	17.38	
r ²	0.63	0.85	0.94	0.94	0.92	0.76	0.53	0.32	

%E_{min}, %E_{max} and <%E> are the %E minimum, maximum, and average of %E, respectively. %S is the standard deviation of %E. r² is the correlation coefficient.

면 SeaWiFS 밴드 3-5의 평균 수출복사량은 2-3 $mW/cm^2/um/sr$ 정도의 값을 보였다. 이후 SeaWiFS 밴드 6-8까지의 장파장대로 갈수록 점점 높은 에러 퍼센트를 보였으며, 865nm 영역에서는 70%, 상관계수는 0.32 정도로 매우 낮은 상관관계를 보였다. 특히 SeaWiFS의 수출복사량이 0.1 $mW/cm^2/um/sr$ 미만으로 매우 낮은 값을 보인, 반면 이어도 종합해양과학기지 에서 측정된 값은 0.3 $mW/cm^2/um/sr$ 정도의 범위를 보여 많은 차이를 나타냈다. 따라서 400nm 대에서는 단파장으로 갈수록 그리고 600nm 이후 영역에서는 장파장으로 갈수록 두 자료간의 차이가 심했으며, 500nm 전후 영역에서는 상대적으로 차이가 적게 나타났다.

Fig. 3은 모든 밴드의 수출복사량 값들을 하나의 그래프로 비교한 것으로 여기서 보면, 장파장대 밴드에서는 물에 의한 흡광이 거의 없으므로 위성자료에서는 수출복사량 값이 거의 0에 가까운 값을 가지며 대부분 대기보정용으로 활용되지만, 실제 이어도 종합해양과학기지에서 측정된 분광자료에서는 장파장대 밴드에서의 수출광량이 0 보다 큰 값을 가지고 있어서 위성자료와의 차이가 크게 나타난다. 그러나 다른 밴드들에 비하면 상대적으로 상당히 낮은 값이므로 큰 영향을 주지 않은 것

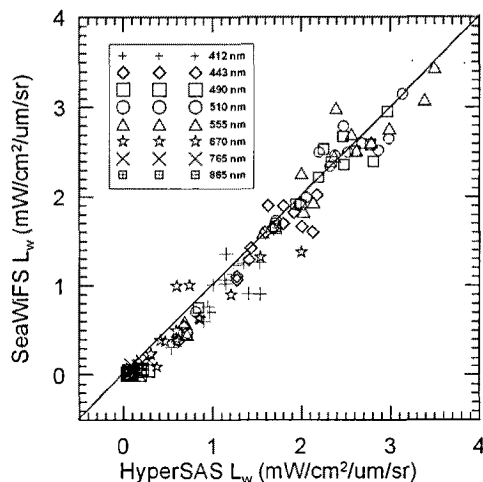


Fig. 3. Comparison between HyperSAS and SeaWiFS water-leaving radiance in all band.

으로 판단된다. 전 밴드 영역에 대해서 HyperSAS의 자료가 SeaWiFS보다 높은 값을 보였지만, 전체적으로는 두 자료간에 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 2003년부터 2004년까지 시기별 관측된 이어도 종합해양과학기지의 HyperSAS 자료와 SeaWiFS 해석자료의 원격반사도 스펙트럼을 비교한 것이다. 값

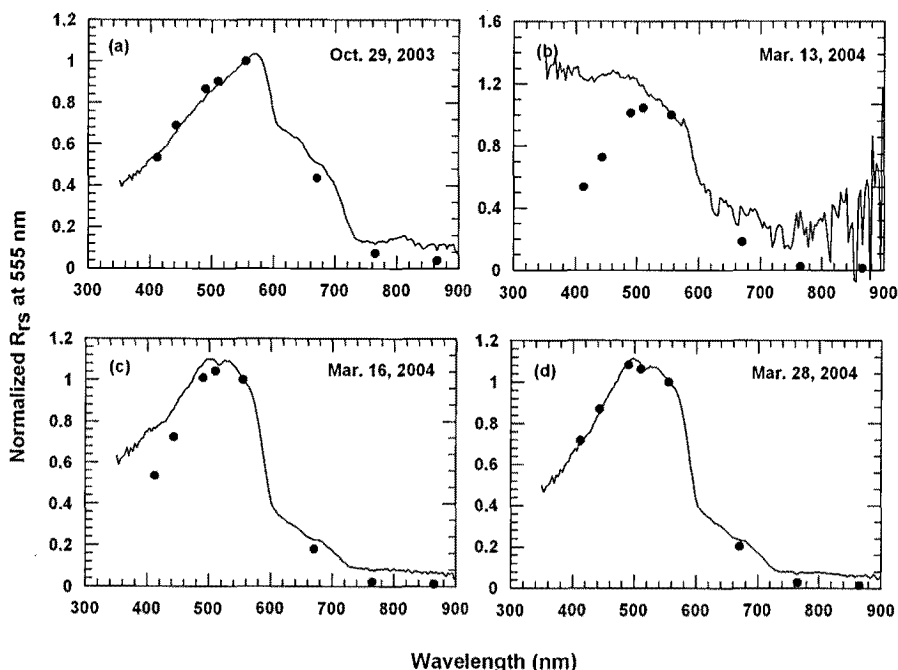


Fig. 4. Comparison of remote sensing reflectance normalized at 555 nm of HyperSAS and SeaWiFS (a) October 29, 2003 (b) March 13, 2004 (c) March 16, 2004 (d) March 28, 2004.

의 차이는 앞에서 그림과 에러 퍼센트로 비교하였으므로, 스펙트럼 형태만을 비교하기 위해 각 스펙트럼의 555nm 밴드를 기준으로 정규화 하였다. (a)와 (d)는 각각 2003년 10월 29일과 2004년 3월 13일에 얻어진 자료로 정규화된 스펙트럼 형태가 매우 잘 일치함을 보인다. (b)는 2004년 3월 10-11일 이틀동안 한반도가 강한 황사의 영향을 받은 다음날인 3월 13일에 관측된 이어도 종합해양과학기지의 HyperSAS와 SeaWiFS 위성자료의 원격반사도 스펙트럼의 형태와 세기를 비교한 것이다. 이어도 종합해양과학기지에서 측정된 신호도 불안정하였으며, 두 자료간에 매우 큰 차이를 보임을 알 수 있다. (c)는 형태가 일치하지는 않지만 유사한 경우로, 단파장대 영역에서 잘 일치되지 않고 있는데, 분석된 15 자료 중 6개 정도의 영상이 이와 같은 경향을 보였다.

대체적으로 추출밴드에 상관없이 SeaWiFS에서 얻은 원격반사도 값은 HyperSAS에서 얻은 원격반사도 값보다 항상 낮은 값을 형성하고 있었는데, 이것은 SeaWiFS 위성자료처리에 사용된 대기보정 알고리즘에 의해 원격반사도 값이 과도하게 보정되었기 때문이라고 생각된다. 이러한 위성자료의 과도한 보정은 위성자료를 이용한 이어도 종합해양과학기지 주변 해역의 엽록소 농도, 총 부유물 농도 등의 해양환경변수들을 산출 혹은 추정하는데 있어서 이들의 오차범위를 증가시키는 요인으로 작용될 수 있다. 따라서 현장관측 등을 통해서 위성자료들의 검보정작업이 반드시 필요하며, 이어도 종합해양과학기지에 설치된 HyperSAS는 이러한 작업을 하는데 아주 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

2) 독도 부이자료를 이용한 해수환경 검정

독도 주변 해수의 광 특성을 분석하고 GOCI 및 유사해색위성의 검보정을 위한 표준관측지점 확보와 시간별 고유팜특성과 외형적광특성(AOP, Apparent Optical Property) 변화를 분석하기 위하여 독도 주변에 설치된 부이에서 2009년 8월과 2009년 10월 2차례에 걸쳐서 매회 11 점점에 대하여 해양 광학적 현장관측과 더불어 해양환경자료도 측정하였다. 현재 DB화된 과거 현장관측자료와 위의 최근 현장관측자료를 통합하여 분석해보면, 식물플랑크톤과 부유물질, 용존유기물의 흡광계수 스펙트럼의 형태들은 대체적으로 각 성분별 흡광 스펙

트럼 특성을 잘 보여주었다. 독도 주변 해역의 해양 광 특성은 원격반사도의 스펙트럼 형태를 기준으로 Case-1 Water 성향이 강한 해수에서 나타나는 특성과 매우 유사하였다. 또한 독도 인근해역의 수심이 낮은 곳은 Case-1 Water와 Case-2 Water의 혼합 형태를 보였다. 하루 중 시간의 변화에 따른 원격반사도의 변화는 시간에 상관없이 스펙트럼 형태는 변하지 않았고 값의 크기만 변했는데 계절적인 영향이 있지만 대체적으로 정오±1h의 원격반사도 값이 가장 크게 나타났다(Fig. 5). 해역의 차이에 따른 원격반사도 스펙트럼 형태의 차이는 조금 보였지만 매우 유사한 형태를 보였다.

독도 부이에 설치된 현장센서와 MODIS Aqua 위성자료의 비교에서는 전반적으로 현장자료와 위성자료에서 추정된 엽록소 농도 값은 잘 일치하는 것을 보여준다(Fig. 6). NASA에서는 절대오차 5% 이내의 수출복사량 자료의 생산과 엽록소 농도가 0.05 - 50 mg/m³ 해역에서 ±35% 이하의 절대오차 범위를 지정해 놓고 있다. 이것은 사용된 대기보정 알고리즘과 엽록소 농도 산출 알고리즘이 지닌 절대오차와 관련이 있다. 따라서 독도

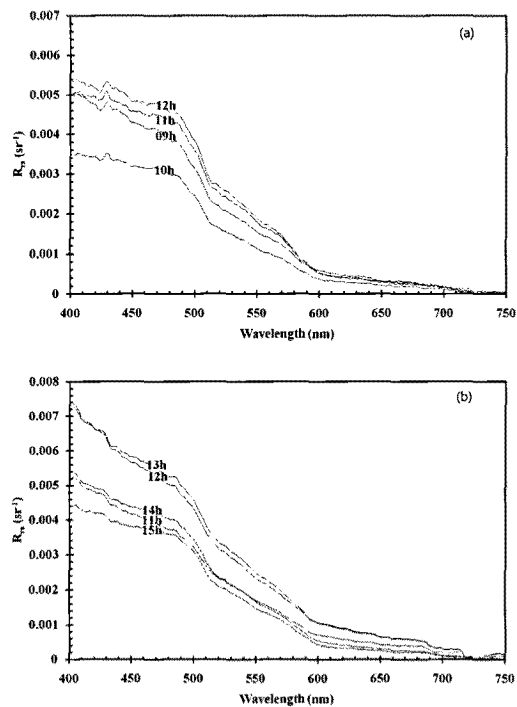


Fig. 5. Spatial and temporal variation of spectra of remote-sensing reflectance on (a) August and (b) October, 2009.

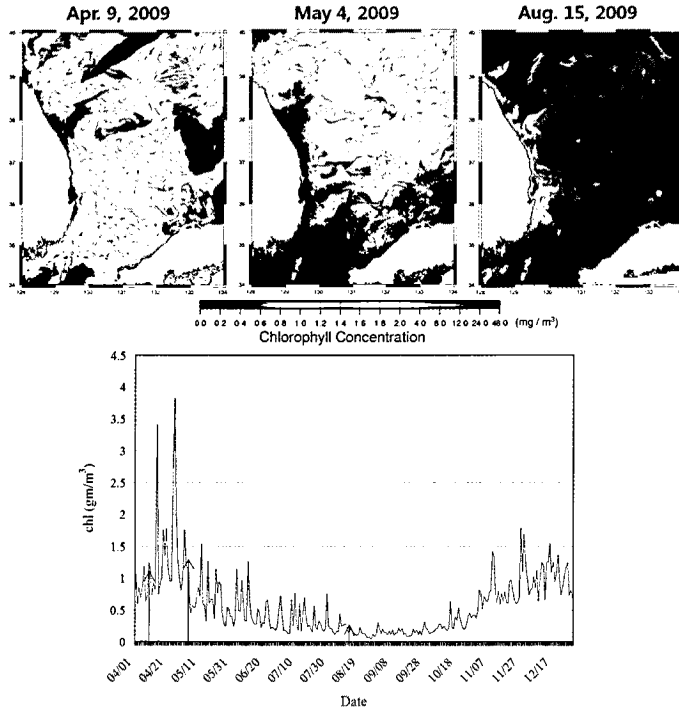


Fig. 6. (a) MODIS Aqua chlorophyll-a concentration on Apr. 9, May. 4, and Aug. 15, 2009. (b) Time-seris data of Fluorometer installed in Dokdo Buoy matched with MODIS Aqua chlorophyll-a concentration with three different days.

부이에 설치된 형광자료 결과는 NASA가 권고한 절대 오차 범위를(< 35%) 만족하고 있으며, 추후 GOCI 해양 환경자료 검보정시 유용한 자료로 활용될 것으로 사료 된다.

4. 토 의

이어도 종합해양과학기지의 분광측정기와 SeaWiFS의 전 밴드에서 얻어진 수출복사량을 비교한 결과 평균 25% 정도의 에러 퍼센트를 보였다. 이와 같은 차이의 첫 번째 원인은 SeaDAS에서 제공하는 표준 대기보정 방법이 맑은 대양의 해수 특성을 고려하여 만들어졌기 때문으로 생각된다. 표준 대기보정 방법은 근적외선 영역(765와 865nm)에서의 수출광량은 0 이라고 가정한 후, 에어로졸의 단산란을 이용하여 12개 에어로졸 모델 중 2개의 에어로졸 모델을 선택한다. 이러한 방법은 765와 865nm에서 에어로졸 모델에 대하여 다중 산란이 거의 비슷하고 레일리 산란의 효과가 매우 약하므로 에어로졸 모델에 관계없이 참값에 가깝게 되는 원리를

이용한 것이다. 이 알고리즘은 765nm에서 산소분자에 의한 흡수 효과가 고려되지 않은 것에 대한 문제를 갖고 있다(Gordon and Wang, 1994). 따라서 25% 정도의 에러 퍼센트 에서 대기보정 밴드를 포함한 SeaWiFS 밴드 6-8만의 절대오차 평균은 약 49% 정도로 발생하고 있으며, 이것은 표준 대기보정 방법의 가정한 근적외선 영역에서의 수출광량은 "0"이라는 것에서 비롯된 것이다(유 외, 2006). 즉 실제로는 근적외선 영역에서도 적은 양의 해수출 광량이 측정되고 있으므로 이에 대한 사항을 고려한 보완된 대기보정 방법이 필요하며, GOCI 자료처리시스템(GDPS)에서는 새로운 대기보정 방법을 제시함으로써 이러한 문제를 해결할 계획이다.

두 번째 원인은 이어도 종합해양과학기지가 위치한 곳은 동중국해의 대륙붕 해역으로 Case-2 Water로 분류되며, 계절별로 장강 희석수와 중국대륙연안수의 영향을 받기 때문에 부유퇴적물이나 용존유기물의 농도가 낮은 Case-1 Water에 비해 높은 해역으로 여겨진다(Babin *et al.*, 2003; Ahn *et al.*, 2004). 따라서 이 지역에서 SeaWiFS 표준 대기보정을 적용하기에는 큰 오차가 발생할 것으로 예측하였으며, 스펙트럼의 형태가

매우 다르게 나타날 것으로 생각하였다. 그러나 실제로 이어도 종합해양과학기지의 분광측정자료와 SeaWiFS 수출복사량을 비교해 본 결과, 절대오차가 평균 25% 정도 발생하기는 하였으나, 대기보정 밴드를 포함한 SeaWiFS 밴드 6-8을 제외하면 절대오차가 평균 11% 정도로 상당히 낮아진다. 또한 주로 해수환경분석에 사용되는 SeaWiFS 밴드 3-5의 절대오차 평균은 약 8% 정도로 더욱 낮아진다. 파장 555nm로 정규화한 원격반사도의 스펙트럼 형태는 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 이는 이어도 종합해양과학기지 주변 해수 특성이 매우 변화가 심하여 계절에 따라 Case-1과 -2 Water의 특성이 혼재함을 의미한다. 겨울철 북서계절풍의 영향을 받는 시기에는 Case-2 Water의 특성을 보이다가 여름철에는 Case-1 Water의 특성을 보였다. 이와 같은 결과는 2003년부터 2005년까지 4차례에 걸친 이어도 종합해양과학기지 주변에 대한 현장조사 결과와도 일치하는데, 이어도 종합해양과학기지를 중심으로 반경 30km 지역에서 얻어진 총 13개 정점에서의 부유퇴적물 농도는 2004년 3월 24일 이어도 기지 옆에서 측정된 10 g/m^3 을 제외하면 모두 10 미만의 값을 보였으며, 평균 5.4 g/m^3 의 값을 보였다(민 외, 2006).

이어도 종합해양과학기지에 설치된 HyperSAS 시스템은 우리나라 최초로 해수분광을 연속적으로 측정할 수 있는 시스템이다. 이와 같이 바다에 설치된 플랫폼 형태의 해양위성 검보정 사이트는 현재 운용되고 있는 AERONET-OC 이외에 국제적으로도 선례가 없기 때문에 설치부터 유지보수 관련하여 많은 어려움이 있었다. 몇 년간의 시행착오를 거쳐 현재는 안정적으로 자료를 수신하고 있으므로 자료처리 분야도 앞으로 체계를 갖추 수 있을 것으로 생각된다.

이어도 종합해양과학기지의 조사와는 달리, 두 차례에 걸친 독도 주변의 현장조사에서 원격반사도 스펙트럼은 파장 460nm 부근에서 반사도 값이 높은 형태의 스펙트럼 형태로 Case-1 Water 성향을 보이지만, Case-2 Water의 해역의 특징도 보여주었다. 또한 시간에 따른 원격반사도 스펙트럼은 시간에 관계없이 원격반사도 스펙트럼 형태는 변하지 않았고, 해역에 따른 원격반사도 스펙트럼의 형태적 차이는 조금 보였다(Fig. 5). 독도 부이에서 얻어진 형광자료와 MODIS Aqua의 엽록소 농도 자료와의 매칭된 자료는 NASA에

서 권고한 절대오차범위를 만족하고 있었고(Fig. 6) 독도 주변 해역 및 동해에 대한 해양환경 변화 모니터링 등의 다양한 연구에 해색위성자료의 활용은 큰 무리가 없을 것으로 판단되지만, GOCI 자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 지속적인 자료 및 센서에 대한 검보정이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한, 독도 부이자료의 경우, 지금까지 운용해양학 차원에서 많은 부이 시스템을 설치하고 사용하였지만 위성자료의 검정에 활용된 적은 없다. 따라서 위성 검정을 위한 관리 방안이 수립되어 많은 활용이 유도하였으면 한다.

지금까지의 결과를 바탕으로 GOCI 자료에 대한 검정 계획을 수립하였다. 1단계는 해수의 시계열 광특성과 환경특성 자료를 확보하기 위하여 현재 운용중인 과학기지와 부이로부터 얻어진 자료를 해색위성자료 검정 시스템을 구축하는 것이다. 2003년 이어도 종합해양과학기지에 설치된 HyperSAS 이외에 2010년 가거초 종합해양과학기지에 AERONET-OC 해수분광기를 설치할 예정이다. 또한 어청도, 황해중부, 독도에 설치된 부이를 이용하여 형광, 탁도, 온도, 염분 등에 대한 해수환경 자료를 수집할 계획이다. 이미 구축된 기지와 부이에 새로운 관측기기를 설치하고 이들 기기에 대한 관리방안을 마련하여 주기적으로 시스템 관리함으로써 양질의 현장관측 자료를 생산할 계획이다. 따라서 1단계 검정 준비의 목표는 고정점에서의 시계열 현장관측 자료를 안정적으로 받는 것이다.

2단계 계획은 1단계에서 실시하였던 고정관측점을 지속적으로 유지하면서, 연안여객선을 활용한 주기적 정선관측과 타 해색위성을 이용한 위성 상호보정 방법을 활용할 계획이다. 연안여객선을 이용한 해색위성자료의 검정은 MERIS 위성자료의 검정을 위하여 유럽에서 사업을 추진한 바 있으며, 우리나라에서도 현재 국립수산과학원을 중심으로 운용중이다. GOCI는 1일 8회 관측으로 타 해색위성이 각기 다른 시간에 우리나라의 관측해역을 통과하더라도 매치업(match-up) 자료를 얻기 용이하다. 하지만 GOCI 및 타 해색위성은 각기 다른 채널수, 분광해상도, 공간해상도, 그리고 센서의 특성이 달라서 비교검증이 쉽지는 않지만, MERIS와 HICO와 같은 밴드수가 많은 해색위성을 이용한다면 검증이 가능한 것으로 사료된다(Curtiss Davis, personal communicated). 각각의 위성의 밴드에 대한 수출광량

및 반사도 비교 외에도 해양환경 알고리즘에서 추정된 산출물인 클로로필, 부유퇴적물, 용존유기물, 적조 분석 자료의 상호 검증이 가능할 것으로 사료된다.

끝으로 지금까지 언급한 GOCI 자료 검정지점은 육지로부터 멀리 떨어져 있어 현장관측기기의 주기적이고 지속적인 관리가 어렵다. 또한 해색위성 검정만을 위하여 만들어진 지점이 아니므로 해색위성의 검정을 위한 추가 장비 설치가 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 센서의 이중화와 각 지점을 운영하는 주체와 해양위성센터간의 긴밀한 협력체제가 요구된다. 이들 검정지점 자료들은 우리나라 위성 뿐 아니라 다른 나라의 해색위성 검정에 적극 활용할 계획이다. 또한 우리나라 주변국의 검정 지점도 적극 활용할 계획이다. 검정 후 알고리즘을 개선하여 GDPS의 업데이트를 통하여 보정을 수행하고자 한다.

사 사

본 연구는 국토해양부 연구개발사업인 정지궤도 해양 위성 활용연구지원 사업 (PM55660)과 종합해양과학기지 구축 및 활용연구 (PM55520)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 민지은, 유주형, 문정연, 안유환, 이규성, 2006. 우리나라 서남부 해역에서의 해수 분광 특성 연구. 한국해양과학기술협의회 춘계공동학술대회, 부산 백스코, 5월 15-16일.
- 문정연, 안유환, 유주형, P. Shanmugam, 2010. 정지궤도 해색탐재체(GOCI) 해수환경분석 알고리즘 개발, 대한원격탐사학회지(본 특별호).
- 유신재, 2002. OSMI 해양활용 및 검보정에 관한 연구. 한국해양연구원, BSPN 451-00-1449-3, 346p.
- 유주형, 문정연, 민지은, 안유환, 심재설, 2006. 이어도 해수분광기를 이용한 위성자료의 대기보정 연구, 한국해양과학기술협의회 춘계공동학술대회, 부산 백스코, 5월 15-16일.
- 한국해양연구원, 2008. 통신해양기상위성 해양자료처리시스템 개발사업(V), 국토해양부, BSPM 43600-1941-1, 279p.
- Ahn, Y. H., P. Shanmugam, and S. Gallegos, 2004. Evolution of suspended sediment patterns in the East China and Yellow Seas, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 39(1): 26-34.
- Babin, M. D. Stramski, G. M. Ferrari, H. Claustre, A. Bricaud, G. Obolensky, and N. Hoepffner. 2003. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe, *Journal of Geophysical Research*, 108(C7): 3211, doi:10.1029/2001JC000882.
- D'Ortenzio, F., S. Marullo, M. Ragni, M. R. d'Alcala, and R. Santoleri, 2002. Validation of empirical SeaWiFS algorithms for chlorophyll-a retrieval in the Mediterranean Sea A case study for oligotrophic seas, *Remote Sensing of Environment*, 82: 79-94.
- Gordon, H. R., and M. Wang, 1994. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm, *Applied Optics*, 22: 20-36.
- Hooker, S. B. and C. R. McClain, 2000. The calibration and validation of SeaWiFS data, *Progress in Oceanography*, 45: 427-465.
- Hooker, S. B., G. Lazin, G. Zibordi, and S. McLean, 2002. An evaluation of above- and in-water methods for determining water-leaving radiances, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19: 486-515.
- Hooker, S. B. and A. Morel, 2003. Platform and environmental effects on above-water determinations of water-leaving radiances, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20: 187-205.
- Hooker, S. B. and G. Zibordi. 2005. Platform

- perturbations in above-water radiometry, *Applied Optics*, 44(4): 553-567.
- Hyde, K. J. W., J. E. O'Reilly, and C. A. Oviatt, 2007. Validation of SeaWiFS chlorophyll a in Massachusetts Bay, *Continental Shelf Research*, 27: 1677-1691.
- McClain, C. R., G. C. Feldman, and S. B. Hooker, 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series, *Deep-Sea Res. II*, 51: 5-42.
- Yoo, S. J., J. S. Park, and H. C. Kim, 2000. Validation of ocean color algorithms in the Ulleung Basin, East/Japan Sea, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 16(4): 315-325.
- Zibordi, G., J.P. Doyle, and S.B. Hooker, 1999. Offshore tower shading effect on in-water optical measurements, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16: 1767-1779.
- Zibordi, G., D. D'Alimonte, and J.F. Berthon, 2004. An evaluation of depth resolution requirements for optical profiling in coastal waters, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21: 1059-1073.