제 출 문

국립해양조사원 원장 귀하

본 보고서를 “인공위성 원격탐사자료 검보정 연구” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2008년 12월 20일

주관연구기관명 : 한국해양연구원
주관연구책임자 : 유 주 형
연 구 원 : 안 유 환
연 구 원 : 문 정 언
연 구 원 : 민 지 은
연 구 원 : 윤 석

요 약 문

Ⅰ. 제 목

인공위성 원격탐사자료 검보정 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

이어도 종합해양과학기지에 설치된 해수분광측정기와 열적외선 온도측정기를 이용하여 해색과 열적외선 위성자료의 대기보정 후 해수출 광량과 해수면 온도를 검정하고자 한다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

- 이어도 해양과학기지에 설치되어 있는 해수분광측정기와 열적외선 온도측정기 자료의 검정
- SeaDAS와 GOCI 대기보정 알고리즘을 SeaWiFS와 MODIS 위성에 적용하고 이들 결과를 이어도 기지에서 얻어진 해수 스펙트럼과 비교 및 검정

Ⅳ. 연구개발 결과

- MODIS 전 밴드의 총 에러 퍼센트는 NASA에서 제안한 해수출광량 오차 5 % 보다 높은 35 %로 분석
- 단파장과 근적외선 영역의 장파장대에서 높은 에러 퍼센트를 보임
- MODIS는 SeaWiFS의 에러 퍼센트보다 약 10 % 높은 값을 보임

Ⅴ. 연구개발 결과의 활용계획

- Kompsat-2 위성 자료의 방사보정
- 통신해양기상위성 해양탑재체의 BRDF 보정
- 녹조와 적조 등과 같은 해양 이상 현상의 모니터링
- 기후변화와 삼협댐의 건설에 따른 부유퇴적물의 계절적 변동 모니터링

SUMMARY

Ⅰ. Title

Calibration and validation study of the ocean color remote sensing data

Ⅱ. Necessities and Objectives of the Study

This research is focused on the calibration and validation of the water-leaving radiance (L_w) and Sea Surface Temperature (SST) data for the effective removal of atmospheric effect by using hyperspectral radiometer and infrared thermometer system installed in the IEODO ocean research station.

Ⅲ. Contents and scopes of the study

- To validate the spectroradiometer and thermometer in the IEODO ocean research station
- To apply and validate the results of SeaDAS and GOCI atmospheric correction methods to SeaWiFS and MODIS ocean color satellite data using in situ spectrum from spectroradiometer.

Ⅳ. Results

- To present the total error percent (35 %) in MODIS all bands which is excess of the 5 % water-leaving radiance criterion that NASA has proposed
- To show the high error percent at shorter wavelength and at higher wavelength of near infrared region
- To show the higher 10 % of error percent than that of SeaWiFS

Ⅴ. Application plans of the results of the study

- To apply the radiometric correction of Kompsat-2 satellite data
- To apply the BRDF(bi-directional Reflectance Distribution Function) correction of GOCI data
- To monitor the ocean abnormal phenomena such as green algae bloom

and red tide

- To monitor the seasonal variation of suspended sediment plume according to climate change and construction of three gorgeous dam

CONTENTS

Chapter 1 Outline of the study ····· 15

Section 1 Objectives of the study ····· 15

Section 2 Necessities and scopes of the study ····· 16

Chapter 2 Status of domestic and oversea technology ····· 21

Chapter 3 Contents and results of the study ····· 27

Section 1 Outline of HyperSAS ····· 27

Section 2 Condition of HyperSAS in 2008 ····· 30

1. Management list of HyperSAS (July 2004 - October 2008) ····· 30

2. Analysis of wrong operation factor of HyperSAS ····· 30

Section 3 Method of the data calculation from HyperSAS ····· 31

1. Calculation of water-leaving radiance (L_w) from HyperSAS ····· 31

2. Calculation of remote sensing reflectance (R_{rs}) from HyperSAS ····· 31

Section 4 SeaWiFS and MODIS Aqua data ····· 32

1. Orbit and band charateristics of MODIS Aqua ····· 32

2. Calculation of L_w and R_{rs} from MODIS Aqua ····· 34

3. Calculation of L_w and R_{rs} from SeaWiFS ····· 34

4. Cross Calibration between SeaWiFS and MODIS Aqua ····· 35

Section 5 Study on the atmospheric correction algorithm ····· 35

1. Introduction ····· 35

2. Atmospheric correction algorithms of CZCS, SeaWiFS and OCTS ····· 37

a. Outline ····· 37

b. Atmospheric correction algorithm of CZCS ····· 37

c. Atmospheric correction algorithm of SeaWiFS ····· 39

d. Atmospheric correction algorithm of OCTS ····· 40

3. Atmospheric correction algorithm of GOCI ····· 41

a. Spectral shape matching method (SSMM) ····· 41

Section 6 Results ····· 47

1. Analysis and comparison between HyperSAS and SeaWiFS data ····· 47

2. Analysis and comparison between HyperSAS and MODIS data ····· 51

3. Analysis and comparison between L_w values derived from the GOCI's atmospheric correction algorithm and L_w values with band obtained from SeaWiFS ····· 55
Section 7 Conclusions and considerations ····· 59

Chapter 4 Achievement and contribution of research objective ····· 63

Chapter 5 Application plan of research results ····· 67

Chapter 6 References ····· 71

List of Tables

Table 3.1 General characteristics of MiniSpec-I and MiniSpec-R ·····28

Table 3.2 Orbit and band characteristics of MODIS Aqua ·····33

Table 3.3 Coefficients for computing the Rayleigh fator $\gamma_{ra}(\lambda_i)$ in the SeaWiFS spectral bands for GOCI new coefficients will be provided after its launch ·····46

Table 3.4 Results of statistical analysis for water-leaving radiance of HyperSAS and SeaWiFS ·····47

Table 3.5 Results of statistical analysis for water-leaving radiance of HyperSAS and MODIS ·····52

Table 4.1 Research goal and viewpoint of the evaluation ·····63

List of Figures

Figure 1.1 Atmospheric effects of ocean color satellite data ·····15

Figure 1.2 Korea's satellite launch plan ·····16

Figure 2.1 standard MOBY specification structure and mooring image of the MOBY ·····21

Figure 2.2 Martha's Vineryard Coastal Observatory (MVCO) system ·····23

Figure 2.3 SeaWiFS Photometer Revision for Incident Surface Measurements (SeaPRISM) of the Aerosol Robotic Network (AERONET) ·····23

Figure 3.1 (a) Photo of HyperSAS OCR-3000, (b) Composition of HyperSAS OCR-3000, (c) STOR-X of HyperSAS OCR-3000 ·····29

Figure 3.2 MODIS Aqua ·····33

Figure 3.3 Flowchart of the SSMM atmospheric correction scheme to retrive water-leaving radiance and chlorophyll concentration from GOCI data in coastal waters(from Shanmugam and Ahn, 2007) ·····46

Figure 3.4 Comparison of band's water-leaving radiance for HyperSAS and SeaWiFS (a) 412 nm (b) 443 nm (c) 490 nm (d) 510 nm (e) 555 nm (f) 670 nm (g) 765 nm (h) 865 nm ·····49

Figure 3.5 Comparison of HyperSAS's L_w and SeaWiFS's L_w ·····50

Figure 3.6 Comparison of spectrum type normalized Rrs at 555 nm for HyperSAS and SeaWiFS (a) Oct. 29. 2003 (b) Mar. 13. 2004. (c) Mar. 16. 2004 (d) Mar. 28. 2004 ·····51

Figure 3.7 Comparison of band's water-leaving radiance for HyperSAS and MODIS Aqua ·····54

Figure 3.8 Comparison of HyperSAS's L_w and MODIS Aqua's L_w ·····55

Figure 3.9 Comparison of L_w obtained from in-situ observation (HyperSAS), L_w obtained from standard atmospheric correction algorithm (SeaWiFS), and Lw obtained from GOCI atmospheric correction algorithm (GOCI). Used satellite data are SeaWiFS data. (a) Oct. 29. 2003 (b) Apr. 20. 2006 ·····57

Figure 3.10 Comparison of spectrum types normalized L_w at 555 nm. HyperSAS means to be obtained from in-situ observation, SeaWiFS means to be obtained from standard atmospheric correction algorithm, and GOCI means to be obtained from GOCI atmospheric correction algorithm. Used satellite data are SeaWiFS data. (a) Oct. 29. 2003 (b) Apr. 20. 2006 ·····58

Figure 5.1 Low-salinity area observed around the south-west part of Jeju during 1 to 5 Aug. 2008. And red-tide and green algea detection area. Small image in the upper left part is the basin of the Yangtze River. (KORDI homepage) ·····67

Figure 5.2 Green algae movement monitoring in the East China Sea and the coastal area of the China using MODIS data from April to August, 2008 ·····68

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 15

제 1 절 연구의 목적 ····· 15

제 2 절 연구의 필요성 및 범위 ····· 16

제 2 장 국내외 기술개발 현황 및 과학기술정보 ····· 21

제 3 장 연구수행 내용 및 결과 ····· 27

제 1 절 해수분광측정기(HyperSAS) 개요 ····· 27

제 2 절 2008년도 해수분광측정기의 상태 ····· 30

1. 해수분광측정기 관리 일지 (2004년 7월 ~ 2008년 10월) ····· 30
2. 해수분광측정기 작동불가 원인에 대한 분석 ····· 30

제 3 절 해수분광측정기로부터 자료 추출 방법 ····· 31

1. 해수분광측정기로부터 수출광량(L_w) 산출 방법 ····· 31
2. 해수분광측정기로부터 원격반사도(R_{rs})산출 방법 ····· 31

제 4 절 SeaWiFS와 MODIS Aqua 해색위성 자료 ····· 32

1. MODIS Aqua의 제원 및 밴드 특성 ····· 32
2. MODIS Aqua 해색위성으로부터 L_w와 R_{rs} 추출 방법 ····· 34
3. SeaWiFS 해색위성으로부터 L_w와 R_{rs} 추출 방법 ····· 34
4. SeaWiFS와 MODIS Aqua의 Cross Calibration ····· 35

제 5 절 해색위성의 대기보정 기술 연구 ····· 35

1. 서론 ····· 35
2. CZCS, SeaWiFS, OCTS의 대기보정 알고리즘 ····· 37
   - 가. 개요 ····· 37
   - 나. CZCS 대기보정 알고리즘 ····· 37
   - 다. SeaWiFS 대기보정 알고리즘(NASA 표준 대기보정 알고리즘) ····· 39
   - 라. OCTS 대기보정 알고리즘 ····· 40
3. GOCI 대기보정 알고리즘 ····· 41
   - 가. Spectral shape matching method (SSMM) ····· 41

제 6 절 연구결과 ····· 47

1. 해수분광측정기와 SeaWiFS 자료의 비교 및 분석 ····· 47

2. 해수분광측정기와 MODIS 자료의 비교 및 분석 ·····51
3. GOCI 대기보정 알고리즘으로부터 산출된 L_w와 해수분광측정기 및 SeaWiFS 자료 비교 ·····55
제 7 절 결론 및 고찰 ·····59

제 4 장 연구개발 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 ·····63

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ·····67

제 6 장 참고문헌 ·····71

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구의 목적

위성으로부터 얻어진 해색 스펙트럼은 해수와 대기 신호의 합으로 이루어지므로 해수만의 신호를 추출하기 위해서는 정밀한 대기보정 방법이 필수적이다(Figure 1.1). 현재 운용되고 있는 다양한 해색센서들(SeaWiFS, OSMI, MODIS, MERIS 등)은 각각의 센서에 적합한 대기보정 알고리즘들을 이용하여 최대한 대기의 영향을 제거해주고 있다. 그러나 이들 대기보정 알고리즘들은 전 세계적인 표준 대기 특성에 맞게 만들어졌으므로 국지적인 이상 대기의 특성은 고려되지 못하고 있다. 또한 지금까지 개발된 대부분의 해색센서들은 대양과 같이 맑은 해역을 대상으로 대기보정과 해수분석 알고리즘이 개발되었기 때문에 우리나라 주변의 황해와 동중국해 같이 탁도가 높은 해역에서 기존의 알고리즘을 활용하기 위해서는 검정이 우선 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 동중국해에 위치하고 있는 이어도 종합해양과학기지에 설치된 광학 관측장비로부터 얻어진 해수출 광량 자료를 이용하여 SeaWiFS와 MODIS용의 대기보정 알고리즘과 국내외 대기보정 방법들의 해수출 광량을 비교하여 검정하고자 한다.

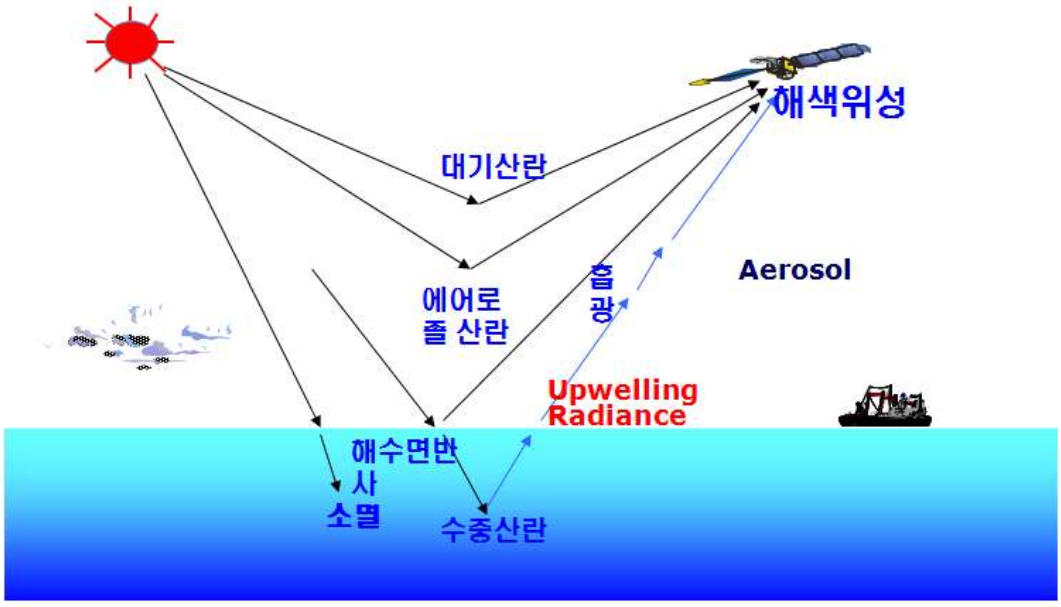

Figure 1.1. Atmospheric effects of ocean color satellite data

우리나라의 우주개발중장기 계획에 따라 다목적위성 1호에 탑재된 해색센서(Ocean Scanning Multispectral Imager, OSMI)를 시작으로 2009년에는 통신해양기상위성의 정지궤도 해색센서(Geostationary Ocean Color Imager, GOCI)가 발사될 예정이다. 따라서 국외 위성자료를 사다가 이용만 했던 시대와는 달리 앞으로 국내위성의 검보정을 통하여 정확한 센서 정보와 검보정 결과자료를 제공함으로서 국내위성의 활용도를 높일 수 있을 것으로 생각된다 (유 등, 2006; Ryu et al., 2007).

Figure 1.2 Korea's satellite launch plan

제 2 절 연구의 필요성 및 범위

미국 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에 의해 해양에서의 pigment 추정을 목적으로 세계 최초의 해색 센서인 Coastal Zone Color Scanner (CZCS)가 Nimbus-7 위성에 탑재되어 1978년 10월에 발사되었다. CZCS는 과학적으로 최초의 해색센서라는 점에서는 성공하였으나, 하루당 2시간의 제한적인 관측시간과 1년의 위성체 lifetime, 그리고 level-1 radiance로부터 유도된 level-2 자료의 10% 이내 자료처리 기준 등 매우 제한적인 목표를 갖고 있었다. 하지만 해색위성을 활용코자 했던 해양연구 그룹들은 CZCS를 계기로 해색위성에서의 검·보정, 대기보정, bio-optical 알고리즘, 자료처리와 자료 접근 등의 해색원격탐사 시스템에 대한 전반적인 요소들의 중요성을 파악하였으며, 많은 교훈을 얻게 되었다 (Hooker and McClain, 2000;

Fabrizio 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 해색센서로 평가받고 있다. 이와 같은 SeaWiFS의 성공 원인으로는 하드웨어적으로 우수한 센서의 개발은 물론 검보정 (Cal/Val) 팀의 다양한 노력의 결과이다. SeaWiFS Cal/Val 사업은 발사 전후에 위성체, 대기, 바다표층과 수중 그리고 실험실과 자료처리 등의 모든 분야에서 이루어지고 있다. 이들의 목표는 절대오차 5 % 이내의 해수출 광량 (water-leaving radiance) 자료를 생산하는 것과 엽록소 (chlorophyll-a) 의 농도가 0.05-50 mg/m^3 지역에서 ±35 % 이하의 엽록소 분석 자료를 생산하는 것이다. 이를 위하여 하와이 부근에 시계열 해수출 광량을 측정하기 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 Experiment (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). 따라서 국내 해색위성이 개발되면 이에 맞는 검보정 사업과 국제협력이 이루어져야 될 것으로 생각되며, 이어도 기지는 위성자료의 검보정 사이트로의 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황 및 과학기술정보

위성에서 관측한 관측치가 실제의 값과 비교해서 절대적 오차에 있어 허용한도 내에 있는지 확인하는 검증작업 (validation)과 정확도를 높일 수 있도록 센서의 보정상수를 적절히 조정하고 위성자료 처리 알고리즘을 개선하는 보정작업 (calibration), 이 두 가지 모두를 일컫는 검보정이라는 작업은 지구를 관측하는 위성자료를 정량적으로 사용하기 위해서 기본이 되고 매우 중요한 작업이다. 일반적으로 위성자료는 3단계의 검보정 단계를 거쳐 원하는 결과를 얻어낼 수 있다. 첫 번째는 디지털 넘버 값으로 기록된 자료를 절대 에너지 값으로 바꾸어 주는 센서 보정 과정이고, 두 번째는 대기에 의한 신호 값을 제거하는 과정으로서 이 대기 신호 보정 과정을 통해서 원하는 지표면 상에서의 값을 얻을 수 있다. 마지막 과정은 절대에너지 값을 클로로필이나 탁도 등의 원하는 지표 값으로 바꾸어주는 과정으로 이 과정에서는 알고자하는 값을 추정할 수 있는 알고리즘을 필요로 한다. 앞에서도 언급했듯이 각각의 과정은 위성자료를 정량적으로 사용하기 위해서 매우 중요하고 필수적이고, 특히 매우 작은 신호값을 갖는 해색원격탐사 분야에서는 더욱 중요하고 정밀하게 이루어져야 한다. 이러한 필요성과 중요성 때문에 해색위성자료를 위한 검보정 연구가 전세계적으로 많이 이루어지고 있다.

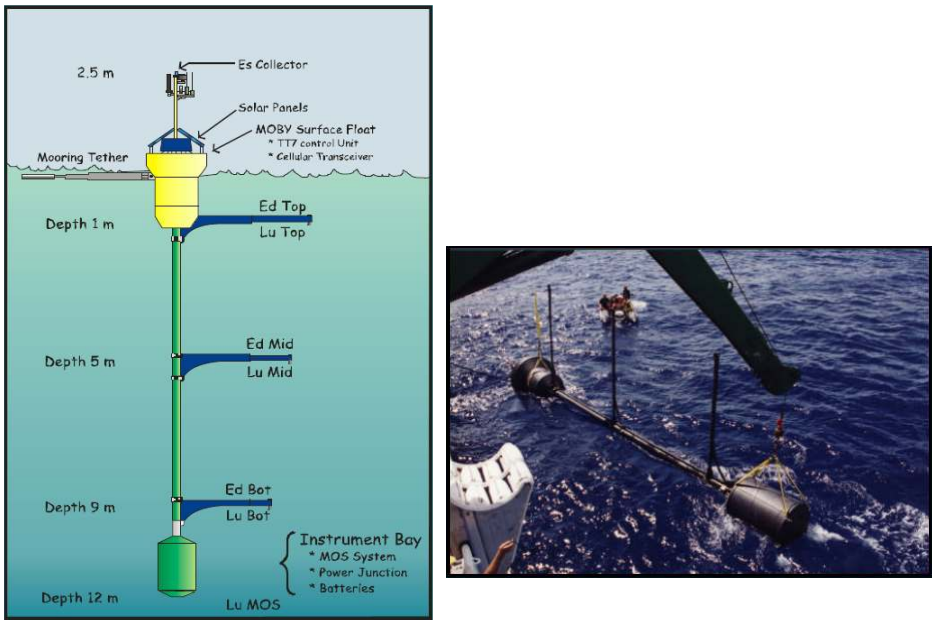

Figure 2.1 Standard MOBY specification structure and mooring image of the MOBY

초기에는 주로 선박을 이용한 검보정이 이루어졌으나 선박을 이용한 위성자료의 검보정은 넓은 지역에 대하여 수중광학 프로파일 자료를 수집하는 데에 시간이 너무 많이 걸리고 기상조건 등의 영향을 많이 받는 단점이 있었다. 따라서 대안으로 부이에 의한 계류 시스템이 활용되어 왔다. 현재 사용 중인 대표적인 시스템은 Figure 2.1의 미국 NASA에서 개발하여 하와이 부근에 설치된 MOBY (Marine Optical Buoy)이다 (MOBY project homepage: http://www.ngdc.noaa.gov/nmmrview/xmls/fgdc.jsp?id=gov.noaa.nosa:NESDIS-MOBY&view=html). 이와 함께 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) (http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI2/adeos/ybom/ybom.html), 영국에서 개발한 Plymouth Marine Bio-Optical Data buoY (PlyMBODy), 유럽의 해색센서인 Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument (MERIS) 검보정을 위한 BOUSSOLE 부이 (http://www.obs-vlfr.fr/Boussole) 등이 있다. 이러한 계류 시스템들은 한 정점에 대해서 시계열 자료를 얻을 수 있으며, 수중에서의 프로파일 자료의 수집이 가능하다는 장점이 있어 맑은 해역에서는 효과적이나 물속에 센서를 잠근 상태에서 관측을 수행하기 때문에 센서 표면의 생물고착물 관리를 철저히 하여야 한다. 따라서 선박을 이용한 관측과 계류 시스템의 대안으로는 바다에 직접 고정 플랫폼을 세워 자동관측 해수분광측정기를 설치하는 것이다. 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 플랫폼을 설치하여 운영하고 있으며 이 플랫폼에서 자료 처리결과를 바탕으로 많은 연구가 보고되었다 (Zibordi et al., 1999; Hooker et al., 2002; Hooker and Morel, 2003; Zibordi et al., 2004; Hooker and Zibordi, 2005) 또한 미국의 매사추세츠 연안에 Martha's Vineyard Coastal Observatory (MVCO)라는 고정 관측 시설물을 설치하여 검보정을 위한 해양 및 대기 자료를 수집하고 있다 (http://mvcodata.whoi.edu/cgi-bin/mvco/mvco.cgi) (Figure 2.2). 그 외에 대기에 의한 영향을 보정하기 위해 SeaWiFS Photometer Revision for Incident Surface Measurements (SeaPRISM)을 이용하여 전 세계곳곳에서 대기 정보를 수직하는 Aerosol Robotic Network (AERONET)가 진행되고 있다 (Figure 2.3).

Figure 2.2 Martha's Vineryard Coastal Observatory (MVCO) system

Figure 2.3 SeaWiFS Photometer Revision for Incident Surface Measurements (SeaPRISM) of the Aerosol Robotic Network (AERONET)

위성 영상을 이용하여 해양온도를 관측하기 위하여 열적외선 영역을 이용한 센서들이 많이 개발되었다. 공간해상도가 약 1km 정도의 이들 자료를 이용하여 전 지구 규모의 해수면 온도 변동, 지구온난화 등의 장기변화 연구가 수행되었고 (Anding and Kauth, 1970; Emery and Yu, 1997, Kilpartric *et al.*, 2001), 열적외선밴드에서의 해수면온도 추출을 위하여 실측자료를 이용하여 오차분석 및 정밀도 향상 연구가 많이 진행되어 왔다 (Yokoyama *et al.* 1996; Emery *et al.* 1997; Mathwe *et al.* 2001). 그러나 아직도 정밀도 향상 및 검보정 분석이 부족한 실정이고 정밀도 향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 해수분광측정기(HyperSAS) 개요

이어도 종합해양과학기지에는 최첨단의 다양한 기상, 해양, 환경 관측장비들이 설치되어 있으며, 그 중에서 HyperSAS OCR-3000 (Satlantic Co.) 해수분광측정 시스템은 해수와 대기 등으로 입사되거나 나오는 광량을 측정하는 광학장비이다. 그 시스템의 구성은 수괴로부터 해수표면을 통과하여 나오는 수출광량과 대기로부터 나오는 대기광량을 각각 측정하는 MiniSpec-R 분광기 2개와 방향에 관계없이 해수로 입사되는 하향광량을 측정하는 MiniSpec-I 분광기 1개로 구성되어 있다. MiniSpec-R과 MiniSpec-I 분광기는 256개의 채널, 300-1200 nm의 측정범위와 3.3 nm의 분광해상도를 가지고 있으며, MiniSpec-R의 Field of View (FOV)는 11.5°이다(Table 3.1). 또한 열적외선을 이용하여 해수 표면의 온도를 측정하는 IR센서로는 Heitronics사의 KT-19.85 IR 온도 센서가 있다. 이 IR센서는 가로 20cm, 세로 14cm, 높이 7cm의 청색 직사각형 상자 크기로 캠코더와 유사한 형태이고, 무게는 1.5kg이다. 측정범위는 최저 -5℃에서 최고 +45℃까지이고, 3초에 한번 측정하도록 설정되어 있다. 그 밖에 위성으로부터 위치정보를 수신하는 GPS와 이들 모든 자료들을 정해진 스케줄에 따라 운용하고 저장하는 콘트롤박스인 STOR-X가 포함되어 있다. Figure 3.1의 (a)는 이어도 종합해양과학기지에 설치된 HyperSAS OCR-3000 해수분광측정 시스템의 실제 사진이며 (b)는 설치된 HyperSAS 시스템의 구성 모식도이다.

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 하향광량(downwelling irradiance, E_d), 대기로부터 나오는 대기광량(sky radiance, L_{sky}), 해수 수괴로부터 해수표면을 통과하여 나오는 총 수출광량(total water leaving radiance, L_{wT}), IR센서를 통해 측정된 해수 표면 온도(sea surface temperature, SST) 등이다.

Table 3.1 General characteristics of MiniSpec-I and MiniSpec-R

Items	MiniSpec-I	MiniSpec-R
Spatial Characteristics		
Field of view	cosine response - within 3% 0° - 60° - within 10% 60° - 85° (300 - 800 nm)	11.5° in air 8.50° in water
Detectors	256 channel silicon photodiode array	256 channel silicon photodiode array
Entrance slit	70 × 2500 um	70 × 2500 um
Pixel size	25 × 2500 um	25 × 2500 um
Spectral Characteristics		
Bandwidth range	300-1200 nm (350-800 nm standard)	300-1200 nm (350-800 nm standard)
Spectral sampling	3.3 nm/pixel	3.3 nm/pixel
Spectral accuracy	0.3 nm	0.3 nm
Spectral resolution	10 nm	10 nm
Stray light	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$
Electrical Characteristics		
Acquisition module	16 bit ADC	16 bit ADC
Digital resolution	16 bits (variable)	16 bits (variable)
Integration time	4 - 8192 ms (adaptive gain feature)	4 - 8192 ms (adaptive gain feature)
Frame rate	0.5 Hz	0.5 Hz
Data rate	9600 to 115200 bps (user selectable)	9600 to 115200 bps (user selectable)
Telemetry interface	RS-422 / RS-232 (isolated)	RS-422 / RS-232 (isolated)
Network interface	RS-485 (isolated)	RS-485 (isolated)
Power requirements	18 - 72 V or 9 - 18 V DC (2 Watts nominal, 3 Watts shutter active)	18 - 72 V or 9 - 18 V DC (2 Watts nominal, 3 Watts shutter active)
Physical Characteristics		
Size	350 mm long (not including connector) 60 mm diameter	319 mm long (not including connector) 60 mm diameter
Weight	1.2 kg	1.2 kg
Depth Rating	100 m	100 m
Operating temperature	-10 to +50 ℃	-10 to +50 ℃

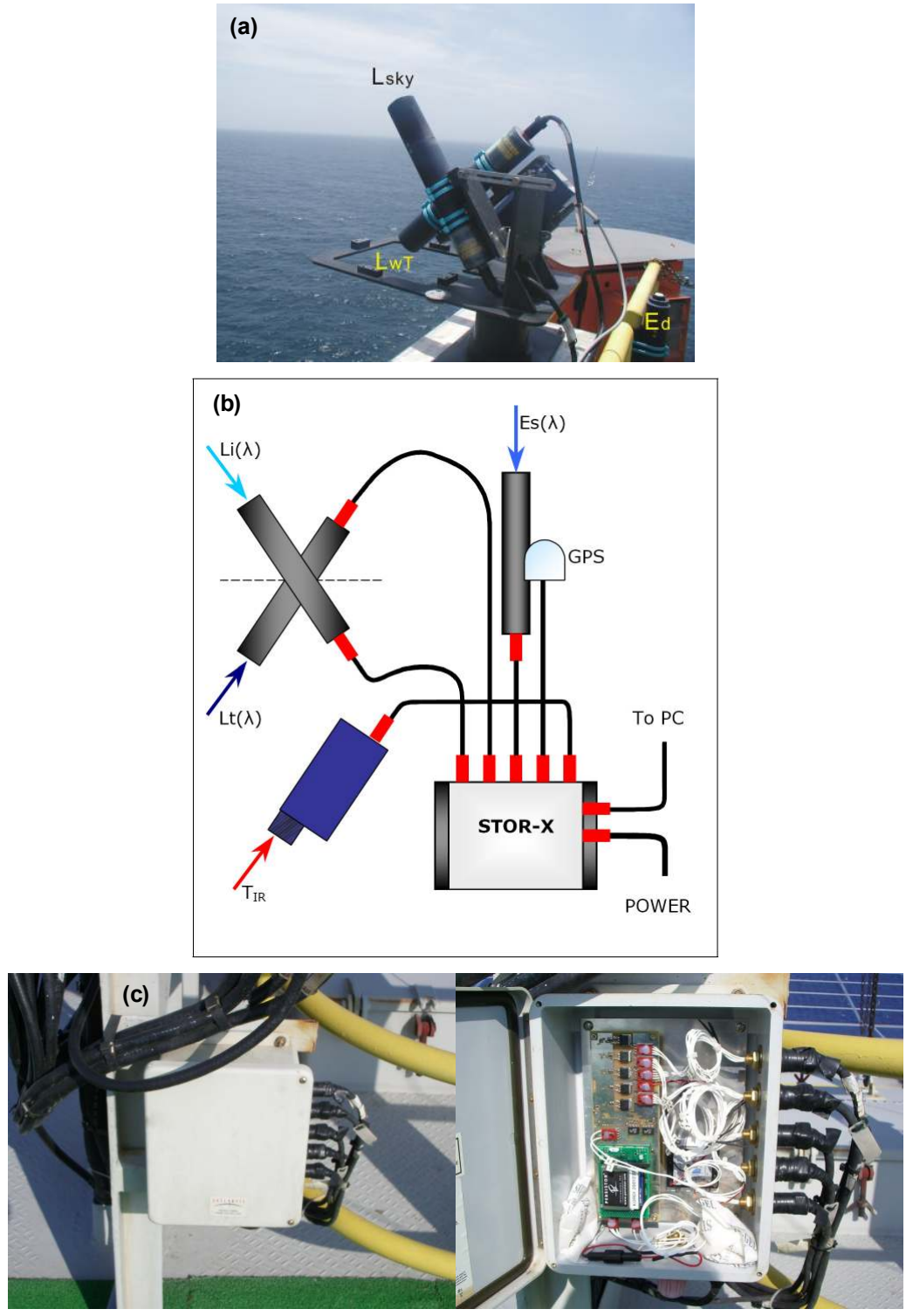

Figure 3.1 (a) Photo of HyperSAS OCR-3000, (b) Composition of HyperSAS OCR-3000, (c) STOR-X of HyperSAS OCR-3000.

제 2 절 2008년도 해수분광측정기의 상태

1. 해수분광측정기 관리 일지 (2004년 7월 - 2008년 10월)

가. 2004년 7월 : 이어도 기지를 방문하여 문제점 (불규칙적인 측정) 확인

나. 2004년 12월 : 센서 제작사인 캐나다 Satlantic사에 A/S 의뢰

다. 2005년 3월 - 7월 : Satlantic 본사에서 시스템의 수리 및 센서 보정

라. 2005년 8월 : 수리/보정된 해수분광측정기 인수 및 기지에 설치하고 테스트

마. 2005년 12월 : 기지 방문하여 해수분광측정기의 최종 테스트 실시

바. 2006년 3월 : 해수분광측정기로 공급되는 전력을 증강하여 안정적인 자료획득 시작

사. 2007년 8월 : 해수분광측정기 점검 및 자료 백업

아. 2008년 8월 : 장비 점검 및 자료 백업의 목적으로 기지 방문하였으나 장비 작동불능 상태가 확인되었고 자료는 2007년 11월 3일부터 25일까지의 자료만 저장되어 있었음

자. 2008년 10월 : 자료저장장치인 STOR-X의 메인보드용 건전지를 교환하고 테스트하였으나 여전히 작동불능 상태임

2. 해수분광측정기 작동불가 원인에 대한 분석

가. 해수분광측정기 시스템의 구성장비들 중에서 IR센서의 작동불능 : 시기적으로 언제쯤인지 정확히 파악되고 있지 않지만 외부의 영향 등에 의해 IR센서 내-외부 장치가 파손(내부로 물이 스며든 흔적 등)으로 작동불능상태에 돌입했으며 이것이 해수분광측정기 시스템 전체로 영향을 줬을 것으로 추정

나. 해수분광측정기 시스템의 구성장비들 중에서 STOR-X 자료저장장치의 고장 : IR센서 파손에 의한 작동불능상태가 약 6개월 이상 지속되고 방치되었고 파손된 IR센서의 철거과정에서 유/무형의 영향을 받아서 STOR-X의 메인보드가 손상되고 해수분광측정기 전 시스템의 다운되었을 것으로 추정

다. 2008년 10월 이후, 해양조사원에서 STOR-X를 교체하기 위하여 준비 중임

제 3 절 해수분광측정기로부터 자료 추출 방법

1. 해수분광측정기로부터 수출광량(L_w) 산출 방법

해수의 수괴로부터 반사되어 올라오는 광(upwelling radiance, L_u)은 해수표면에 형성된 물과 대기의 경계면에서 일부분은 반사되어 해수 밑바닥으로 되돌아가고, 나머지는 해수표면 밖으로 나오게 된다. 이와 같이 해수표면에 형성된 물과 대기의 경계면을 통과하여 나오는 해수 수괴로부터 반사된 광량을 수출광량(water leaving radiance, L_w)라고 정의한다. 그런데 이어도 기지에 설치된 HyperSAS 해수분광기에 의해 측정된 해수표면으로부터 나오는 광량(L_{wT})은 L_w와 해수표면에서 반사된 L_{sky}의 일부 광이 혼합된 것이다. 대기 및 창공의 blue sky(혹은 에어로졸)에서 나오는 광량의 일부가 해수표면에 형성된 물과 대기의 경계면에서 반사되는 광량을 Fresnel reflection(F_r)라고 하는데, 일반적으로 입사각이 30°일 때 2.5 %의 반사도가 발생된다. 그러므로 해수표면에서 반사되는 L_{sky}의 일부 광은 L_{sky}와 F_r의 관계식에서 얻을 수 있다. 따라서 파장(λ)에 따른 L_w 값은 다음과 같은 식에 의해서 계산하였다.

$$L_w(\lambda) = L_{wT}(\lambda) - \{L_{sky}(\lambda) \times F_r(\lambda,\theta)\} \tag{3.1}$$

여기서, $L_{wT}(\lambda)$는 HyperSAS에서 측정된 파장에 따른 총 수출광량이고, $L_{sky}(\lambda)$는 HyperSAS에서 측정된 파장에 따른 대기광량이고, $F_r(\lambda,\theta)$는 Fresnel reflectance 값으로, 파장과 입사각(θ)의 함수이며 이어도 기지에 설치된 HyperSAS의 입사각은 30°도 설정되어 있으므로 2.5 %의 반사도 발생에 따른 값 0.025로 파장에 상관없이 일정하다고 가정하였다.

2. 해수분광측정기로부터 원격반사도(R_{rs}) 산출 방법

해수의 반사도(irradiance reflectance)는 해수표면에 입사되는 광량(downwelling irradiance)과 해수표면을 통과해서 나오는 광량(upwelling irradiance)과의 비 값(단위가 없음)을 나타낸 것으로서, 해수표면에서 광의 분포 특성에 따라 변하는 외관상 해수의 색깔이라고 정의된다. 따라서 해수에 의한 반사도 스펙트럼은 일반적으로 파장에 따른 물체의 표면반사가 아니고 물덩어리 그 자체에 의한 반사이므로, 해수 중 물질의 양과 질에 관한 정보를 갖게 된다. 해수 반사도 $R(0^-,\lambda)$의 일반적인 관계식은 다음과 같다.

$$R(0^-,\lambda) = \frac{E_u(0^-,\lambda)}{E_d(0^-,\lambda)} \tag{3.2}$$

여기서, $E_u(0^-,\lambda)$는 upwelling irradiance로서, 해수표면 바로 아래(-)에서 360° 모든 방향에 대하여 해수 밑바닥에서 올라오는 총 광량을 측정한 값이고, $E_d(0^-,\lambda)$는 downwelling irradiance로서, 해수표면 바로 아래에서 360° 모든 방향에 대하여 해수표면에 입사되는 총 광량을 측정한 값이다.

그러나 인공위성에서는 $E_u(0^-,\lambda)$을 측정하는 것이 불가능하지만, L_w을 측정할 수 있고, E_d는 대기권 밖에서 측정 가능하다. 그러므로 L_w, E_d 두 광학적 인자의 비 값을 사용하여 해수의 반사도를 분석하게 되는데, 이것을 원격 반사도(Remote sensing reflectance, R_{rs})라 부른다. 본 연구에서는 이어도 기지에 설치된 HyperSAS에 의해 측정된 E_d값이 해수면 바로 위 선상에서 측정한 값이므로, R_{rs}는 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$R_{rs}(0^+,\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(0^+,\lambda)}[sr^{-1}] \tag{3.3}$$

여기서, R_{rs}는 원격반사도(Remote sensing reflectance)라고 하며, 인공위성에서 측정하는 해수의 반사도 개념과 유사하기 때문에 해색 원격탐사에서 주로 많이 사용되는 인자이다. R_{rs}스펙트럼 모양이 irradiance reflectance(R)와 동일한 모양을 하고 있는가의 문제는 L_w 스펙트럼 모양이 upwelling irradiance (E_u)와 동일한 모양인가 하는 것으로 연결된다. 일반적으로 L_w는 E_u의 값 중에서 주어진 어떤 방향에 대한 각성분 값일 뿐이며 단지 방향에 따라 그 값의 크기가 달라질 뿐이다. 따라서 모든 방향에 대한 L_w 스펙트럼 모양과 E_u 스펙트럼 모양은 동일하다고 할 수 있다.

제 4 절 SeaWiFS와 MODIS Aqua 해색위성 자료

1. MODIS Aqua의 제원 및 밴드 특성

MODIS Aqua는 위성수명이 다 된 SeaWiFS를 대체하고 SeaWiFS의 뒤를 이어서 지속적으로 전 지구 해양의 해색자료를 생산하기 위해서 미항공우주국

(NASA)에서 개발한 위성이다. 명칭에서 알 수 있듯이 MODIS Aqua는 해양 관측용으로 개발되었고, 동일한 제원을 갖는 MODIS Terra는 육상관측용으로 개발되었다. MODIS Terra는 1998년 12월, MODIS Aqua는 2002년 5월에 발사되어 궤도에 안정적으로 정착하였다. MODIS Aqua는 극궤도 위성으로 주요 제원 및 밴드 특성은 Table 3.2와 같고 모식도는 Figure 3.2와 같다.

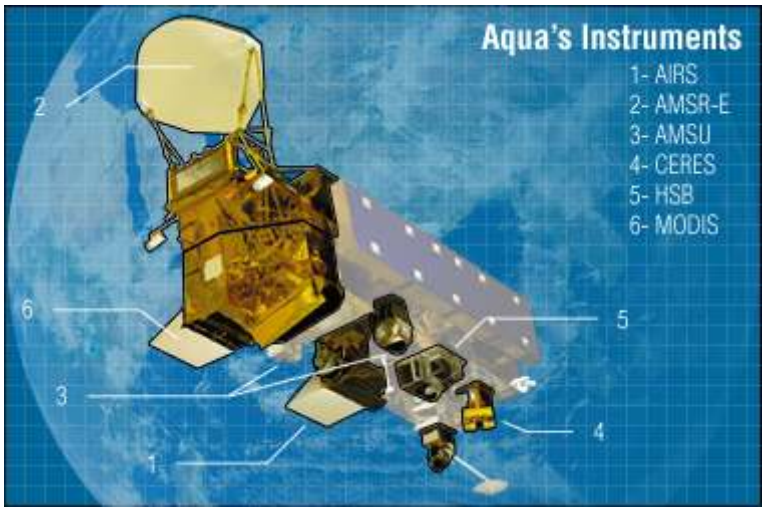

Figure 3.2 MODIS Aqua.

Table 3.2 Orbit and band characteristics of MODIS Aqua

Orbit Characteristics			
Orbit type	Sun synchronous, near-polar orbit		
Equatorial crossing	1:30 p.m., acsending node		
Inclination	98°		
Altitude	705 km		
Period	99 mimutes		
Semi-major axis	7085 km		
Eccentricity	0.0015		
Band Characteristics			
Band	Wavelength(nm)	Bandwidth(nm)	Primary use
8	412	15	Gelbstoffe, CDOM
9	443	10	Chlorophyll absorption
10	488	10	Pigment absorption
11	531	10	Chlorophyll absorption
12	551	10	Pigments, optical properties, sediments
13	667	10	Chlorophyll fluorescence
14	678	10	Atmospheric correction
15	748	10	Atmospheric correction
16	869	15	Atmospheric correction

2. MODIS Aqua 해색위성으로부터 L_w와 R_{rs} 추출 방법

본 연구에 사용된 MODIS Aqua 해색위성자료들은 ocean color website (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov)에서 해수분광측정기와 동일한 날짜에 관측된 자료들을 검색하여 선별하였다. 기간은 2003년 8월부터 2006년 12월까지이다. MODIS Aqua 해색위성자료의 처리는 SeaDAS 소프트웨어를 이용하여 ocean color website에서 내려받은 L1A 자료로 GEO 파일을 생성하고, L1B 자료로 변환한다. L1B 자료와 GEO 파일을 이용하여 L2로 변환하는데 이때 대기보정 알고리즘과 엽록소 산출 알고리즘 등의 각종 분석 알고리즘들이 적용된다. L_w는 water-leaving radiance, 수출광량으로 해수표면을 통과하여 나오는 광량이다. 이 수출광량은 대기보정 알고리즘과 아주 밀접한 관계를 가지며, SeaDAS 소프트웨어에서는 Gordon and Wang (1994)의 알고리즘을 기반으로 입력된 자료로부터 밴드별 수출광량을 산출한다. 이렇게 산출한 자료들을 해수분광측정기의 자료와 밴드별로 비교 분석하였다.

MODIS Aqua L2 자료로부터 얻은 원격반사도(R_{rs})는 다음과 같은 식에 의하여 계산되었다 (Zibordi *et al.*, 2002).

$$R_{rs}_nnn = \frac{L_{wN}_nnn}{F_0_nnn} \tag{3.4}$$

여기서, nnn는 MODIS Aqua의 9개 밴드를 나타내고, F_0는 대기권 밖에서 측정한 태양복사량 (solar irradiance)이고, L_{wN}는 대기가 없고 태양의 광량이 해수표면과 수직을 형성한다고 가정할 때, 해수표면을 통과해서 나오는 수출광량 (normalized water- leaving radiance)을 의미한다.

3. SeaWiFS 해색위성으로부터 L_w와 R_{rs} 추출 방법

본 연구에 사용된 SeaWiFS 자료는 한국해양연구원에서 1998년부터 2006년 12월까지 수신한 자료들 중에서 이어도 종합해양과학기지의 해수분광기와 동일한 날짜에 측정된 21개의 자료들을 선별하였다. SeaWiFS 위성자료의 처리는 MODIS Aqua의 자료처리 소프트웨어와 동일한 SeaDAS 소프트웨어를 이용하여 위성에서 수신한 Level 0 자료를 센서, 지형과 radiance 보정 처리하여 Level 1A 자료를 생산하고, 생산된 Level 1A 자료를 대기보정과 각종 분석 알고리즘을 적용함으로서 Level 2 자료를 생산하였다. Level 2 자료들 중 밴드별 L_w와 R_{rs} 자료들을 이용하여 이어도 종합해양과학기지에 설치된 HyperSAS 해수분광 측정자료와 비교 분석하였다. 원격반사도(R_{rs}) 산출방법은

위의 MODIS Aqua와 동일하다.

4. SeaWiFS와 MODIS Aqua의 Cross Calibration

다양한 해색위성들 중에서 그들이 지닌 밴드 특성이 유사한 것들이 많다. 이러한 유사 혹은 공통되는 밴드 특성을 이용하여 상호 검보정 (Cross Calibration) 수행이 가능하다. 또한 이어도 해양종합관측기지에 설치된 해수분광측정기를 이용하여 보다 정밀한 상호 검보정이 가능하다. 방법은 동일 혹은 유사한 밴드 특성을 가진 해색위성자료들에서 밴드별로 L_w, R_{rs} 혹은 L_{wN}를 추출하여 각 해당 밴드별로 비교 분석한다. 본 연구에서는 L_w를 이용한 단순 비교 분석을 하였다.

제 5 절 해색위성의 대기보정 기술 연구

1. 서론

위성에 의한 지구관측은 탑재된 센서를 이용하여 지표 또는 대기로부터 방출되는 전자기파 형태의 에너지를 관측하는 것이다. 태양에 의한 복사에너지는 대기 중에 존재하는 분자, 에어로졸 등의 입자에 의해 흡수 및 산란되어 태양광 또는 산란광으로서 지표에 도달하게 된다. 지표에 도달한 태양광은 다시 흡수, 반사, 굴절 등의 작용을 받아 지표에서 센서 방향으로 전달되며, 이때 대기를 거치면서 다시 대기입자에 의해 흡수 및 산란을 거쳐 최종적으로 대기권 외의 위성 센서에 의하여 감지된다. 일반적으로 센서에 도달하는 총 복사휘도에서 물속에서 나오는 복사휘도는 약 10 % 정도의 값만을 가지므로 10 % 정도의 오차범위에서 정확한 해색을 얻기 위해서는 1 % 정도의 정확성을 갖는 대기 효과의 보정이 필요하다 (Gordon *et al.*, 1983).

센서에 도달하는 가시광선 영역의 빛은 여러 경로를 가지며 아래의 식과 같이 간략화 된 대기복사 전달 방정식을 도입할 수 있다.

$$L_{sat} = L_r + L_a + L_{ra} + TL_g + t_d \cdot L_w \tag{3.5}$$

우리가 구하고자 하는 값은 물속으로부터 나오는 복사휘도 L_w로, 위성의 센서에서 감지되는 총 복사휘도 L_{sat}로부터 나머지 항들을 제거함으로서 얻을 수 있다. L_r와 L_a는 각각 대기 분자에 의한 레일레이 다중 산란과 에어로졸에 의한 다중 산란에 의한 복사휘도를 말한다. L_{ra}는 대기분자와 에어로졸 입자

사이의 상호 작용에 의한 복사휘도로 먼저 대기 분자에 의해 산란된 후 에어로졸 입자에 의해 다시 산란되거나, 반대로 에어로졸 입자에 의해 먼저 산란된 후 다시 대기 분자에 의해 산란되어 센서까지 올라오는 복사휘도를 말한다. L_g는 태양광이 해수 표면에 직접 반사되어 올라오는 복사휘도를, T와 t는 각각 직선광의 투과도와 산란광의 투과도로 다음과 같이 정의 된다 (Gordon, 1993; Gordon *et al.*, 1997).

$$T(\lambda) = \exp[-(\tau_r(\lambda) + \tau_{oz}(\lambda) + \tau_a(\lambda)/\cos\theta] \tag{3.6}$$

$$t(\lambda) = \exp[-(\tau_r(\lambda)/2 + \tau_{oz}(\lambda)/\cos\theta] t_a(\lambda) \tag{3.7}$$

여기서 τ_r, τ_{oz}, τ_a는 각각 공기분자, 오존과 에어로졸의 광학적 두께를 의미하며 θ는 센서의 천정각이다. $t_a = \exp[-[1-\omega_a(\lambda)F(\lambda)]\tau_a(\lambda)/\cos\theta]$이다. 여기서 F는 광자가 에어로졸에 의해 90도 이하로 산란될 확률로 $[1-\omega_a(\lambda)F(\lambda)]$은 보통 1보다 훨씬 적으므로 에어로졸의 광학적 두께에 크게 영향을 받는다. ω_a는 단산란 알베도로 분산계수(extinction coefficient)에 대한 산란계수 (scattering coefficient)의 비를 의미한다. 산란광의 투과도에서 공기분자에 의한 레일레이 광학적 두께를 2로 나눈 것은 레일레이 산란의 전방 산란이 결과 투과율에 영향을 미치지 않기 때문이다. L_g는 센서가 바라보는 각도를 조절함으로서 제거할 수 있으므로 결국 정확한 L_w를 구하기 위해서는 대기분자와 에어로졸의 산란에 의한 효과, 즉 대기의 간섭효과를 정확히 계산해야만 한다. 대기 분자에 의한 효과는 대기의 수직분포가 잘 알려져 있고, 그다지 심하게 변화지 않으므로 비교적 정확하게 그 효과를 계산할 수 있다. 그러나 에어로졸에 의한 산란은 레일레이 산란과는 달리 에어로졸의 양상이 시간과 공간에 따라 많은 차이를 보이므로 그 효과를 미리 고려할 수 없다. 그동안 CZCS, SeaWiFS 그리고 OCTS 등의 해색 센서에서의 대기보정 알고리즘을 개발하는 과정에서 에어로졸의 효과를 고려하는 방법들이 제시되었고, 지금 현재에도 사용되고 있지만 여전히 에어로졸 효과는 해색을 위한 대기보정 알고리즘에서 가장 중요한 문제로 남아 있다.

그러므로 해색위성자료의 대기 보정에 대한 연구는 해색 위성이 개발되기 시작하면서부터 활발히 연구되어왔는데, CZCS 위성의 경우 Gordon (1978)에 의한 단일 산란 알고리즘을 이용하였으며, SeaWiFS와 MERIS는 복잡한 다산란 알고리즘을 채택하여 사용하고 있다 (Gordon and Wang, 1994; Antoine and Morel, 1999). 하지만 지금까지 개발되었던 해색위성의 대기보정 방법들은 맑은 바다의 특성을 갖는 Case-I 지역에서는 비교적 좋은 결과를 보였지만 DOM (Dissolved organic matter)과 부유퇴적물의 농도가 높은 우리나라 서해

연안 지역 (Case-II)에서는 적합하지 않은 것으로 분석되었다. 이는 우리나라 연안에서는 맑은 물의 L_w (water-leaving radiance)가 근적외선 파장대에서 0이 아니기 때문이다.

2. CZCS, SeaWiFS, OCTS의 대기보정 알고리즘

가. 개요

대기 복사 전달 방정식에서 복사휘도 (L)보다는 단위가 없는 반사도 (ρ)로 표현하는 것이 여러 가지 면에서 편리하고 또한 복사휘도 대신 반사도를 이용하여 해색을 보정하게 됨으로 다음과 같이 반사도를 도입하도록 한다 (Gordon *et al.*, 1994).

$$\rho(\lambda) = \pi L(\lambda) / E_0(\lambda) \cos\theta_0 \tag{3.8}$$

여기서 E_0는 대기권 밖에 도달하는 파장 λ의 태양복사량이고, θ_0는 태양의 천정각을 말한다. 즉, 반사도는 L이 등방형으로 퍼져 나갈 때 대기권 최상부에서의 반사도를 말한다. L_g는 앞에서 이미 언급했듯이 센서가 바라보는 방향을 고려함으로서 충분히 제거할 수 있으므로 식 3.8의 관계를 식 3.5에 도입하면 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\rho_{sat}(\lambda) = \rho_r(\lambda) + \rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda) + t \cdot \rho_w(\lambda) \tag{3.9}$$

따라서 우리가 원하는 정확한 해색을 얻기 위해서는 식 3.9에서 대기의 다중산란 효과인 $(\rho_r(\lambda) + \rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda))$을 정확하게 계산하여야 한다. 1978년 발사된 Nimbus-7에 탑재된 CZCS에서 측정된 자료의 처리과정에서 정량적인 해색 정보를 얻기 위해 대기보정 알고리즘에 관한 많은 연구가 수행되었다. 이러한 연구를 바탕으로 1997년 발사된 SeaWiFS는 보다 나은 대기보정 알고리즘으로 운영되고 있으며, 이보다 먼저 발사된 OCTS 역시 SeaWiFS와 비슷한 알고리즘을 바탕으로 운영되었다. 이 세 가지의 대기보정 알고리즘은 모두 에어로졸 산란에 의한 효과를 보정하는데 가장 중점을 두고 있으며, SeaWiFS와 OCTS에서는 에어로졸 모델을 사용하여 그 효과를 고려하고 있다. 지금까지 개발된 대기보정 알고리즘을 살펴보면 다음과 같다 .

나. CZCS 대기보정 알고리즘

CZCS는 해색을 위한 4개의 가시광선 영역의 밴드와 1개의 근적외선 밴드를 가지고 있으며, 해수면 온도를 위한 하나의 열적외선 밴드를 가지고 있는 센서이다.

CZCS가 발사된 후 대기보정을 위한 많은 연구가 진행되었으며, 이러한 연구는 해색을 위한 대기보정 알고리즘의 기초를 제공하였다. 이렇게 처음 개발된 CZCS 대기보정 알고리즘에서는 다중 산란을 고려하지 않고 단산란 효과만을 고려하였다. 따라서 식 3.9는 다음과 같이 단순하게 표현된다.

$$\rho_{sat}(\lambda) = \rho_{rs}(\lambda) + \rho_{as}(\lambda) + t \bullet \rho(\lambda) \tag{3.10}$$

여기서 아래첨자 s는 단산란 (single scattering)을 의미한다. 대기 분자에 의한 레일레이 산란은 표준 대기 기체의 연직 분포로부터 대기 복사 전달 모델을 통해 계산이 가능하다. 에어로졸에 의한 단산란은 에어로졸의 광학적 두께가 작은 경우 대기 복사 전달 방정식으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \rho_{as}(\lambda) &= \omega_a(\lambda)\tau_a(\lambda)P_a(\theta_v,\phi_v;\theta_0,\phi_0;\lambda)/4\cos\theta_v\cos\theta_0 \\ P_a(\theta_\nu,\phi_\nu;\theta_0,\phi_0;\lambda) &= P_a(\theta_-,\lambda) + (r(\theta_\nu)+r(\theta_0))P_a(\theta_+,\lambda) \\ \cos\theta_\pm &= \pm\cos\theta_0\cos\theta_\nu - \sin\theta_0\sin\theta_\nu\cos(\phi_\nu-\phi_0) \end{aligned} \tag{3.11}$$

여기서 $P_a(\alpha,\lambda)$는 산란각 α에 대한 에어로졸 산란 위상 함수이고 ω_a 는 에어로졸 단산란 알베도이다. $r(\alpha)$는 입사각 α에 대한 해수면의 정반사율 (fresnel reflectance)을 말하고, θ_0와 θ_v는 각각 태양과 센서의 천정각, ϕ_0와ϕ_v는 태양과 센서의 방위각을 의미한다. 그러나 에어로졸은 시간과 장소에 따라 매우 다른 양상을 보이므로 식 3.11에서 에어로졸의 단산란 반사율을 구하는 것은 불가능하다. 따라서 CZCS 대기보정 알고리즘은 몇 가지 가정을 통해 이 문제를 해결하였다.

우선 충분히 낮은 식물성 플랑크톤의 농도(C)를 가진 맑은 해양에 대해서 $\rho_w(670)$은 0으로 둘 수 있고, 따라서 식 3.10으로부터 $\rho_{as}(670)$의 값을 구해 낼 수 있다. 여기서 새로운 변수 $\epsilon(\lambda_1,\lambda_2)$과 $[\rho_w(\lambda)]_N$을 다음과 같이 도입한다.

$$\epsilon(\lambda_1,\lambda_2) \equiv \frac{\rho_{as}(\lambda_1)}{\rho_{as}(\lambda_2)} = \frac{\omega_a(\lambda_1)\tau_a(\lambda_1)P_a(\theta_\nu,\phi_\nu;\theta_0,\phi_0;\lambda_1)}{\omega_a(\lambda_2)\tau_a(\lambda_2)P_a(\theta_\nu,\phi_\nu;\theta_{0,}\phi_0;\lambda_2)} \tag{3.12}$$

$$[\rho_w(\lambda)]_N \equiv \rho_w(\lambda)/t(\theta_{0,}\lambda) \tag{3.13}$$

$[\rho_w(\lambda)]_N$는 결과적으로 태양이 천정에 있고, 대기의 효과가 제거되었을 때의 $\rho_w(\lambda)$를 의미한다. $\epsilon(\lambda_1,\lambda_2)$의 정의로부터 우리가 구하고자 하는 파장 λ_i에 대해서 $\rho_w(\lambda_i)$는 식3.10으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\rho_w(\lambda_i) = \frac{1}{t}[\rho_t(\lambda_i) - \rho_{rs}(\lambda_i) - \epsilon(\lambda_i,670)\rho_{as}(670) \tag{3.14}$$

$\epsilon(\lambda_i,670)$은 충분히 낮은 C에 대하여 $[\rho_w(550)]_N$이 거의 일정하다는 것으로부터 다음의 식3.15을 이용하여 n을 구해내고, 이를 통해 나머지 파장에 대한 $\epsilon(\lambda_i,670)$을 구해낸다 (Gordon *et al.*, 1988).

$$\epsilon(\lambda_i,670) = (\frac{670}{\lambda_i})^n \tag{3.15}$$

이때 n은 거의 일정한 값을 가진다.

CZCS 대기보정 알고리즘은 이상과 같은 방법으로 위성자료로부터 정량적인 해색의 반사도를 구해내게 된다. 그러나 앞에서 언급했듯이 이 알고리즘은 우선 C가 충분히 작아야 하는 문제가 있으므로, 만약 센서가 보게 되는 이미지가 맑은 해양을 가지지 않는다면 정확한 해색을 얻을 수가 없게 된다. 또한 $[\rho_w(550)]_N$이 일정하다는 가정과 식 3.15를 통한 다른 파장으로의 외삽은 많은 문제점을 포함하고 있어 실제 적용에 있어서 많은 오차를 발생시킬 수 있다. 그리고, CZCS 알고리즘은 기본적으로 대기의 단산란 만을 고려하였으므로, 대기와 에어로졸의 다중 산란 효과가 무시되어 있다. 이러한 CZCS 알고리즘의 문제는 보다 좋은 감지도를 가지고, 더 많은 밴드를 보유한 OCTS와 SeaWiFS가 올라가면서 에어로졸 모델을 이용한 알고리즘으로 한층 더 발전하게 된다.

다. SeaWiFS 대기보정 알고리즘 (NASA 표준 대기보정 알고리즘)

SeaWiFS는 오랜 준비를 거쳐 1997년 발사되었으며 해색을 위하여 총 8개의 밴드를 가지고 있다. 즉, 가시광선 영역에 6개의 밴드(412, 443, 490, 510, 555, 670 nm)와 대기보정을 위하여 근적외선 영역에 2개의 밴드(765, 865 nm)를 가지고 있다.

SeaWiFS는 Gordon *et al.* (1994)이 제시한 알고리즘을 기본으로 해색을 위한 대기보정을 하고 있다. SeaWiFS 알고리즘은 CZCS 알고리즘과는 달리 다중 산란 효과를 고려하고 있으며 또한 에어로졸 효과의 보정을 위해 에어로졸 모델을 사용하고 있다. Gordon *et al.* (1994)은 에어로졸 유형을 대류권 (tropospheric) 에어로졸 모델, 해양성(maritime) 에어로졸 모델 (Shettke and Fenn, 1979), 해안형(coastal) 에어로졸 모델로 나누었으며 이들에 대해 각각 상대습도 50 , 70, 90과 99 %로 나누었으므로 총 12가지로 구분하여 사용하였다. SeaWiFS 대기보정 알고리즘은 도식적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon(765,865) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\epsilon_i(765,865) \tag{3.16}$$

$$t\rho_w(\lambda) = \rho_t(\lambda) - \rho_r(\lambda) - [\rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda)]$$

$$\rho_t(765) - \rho_r(765),\ \ \rho_t(865) - \rho_r(865) \rightarrow^{NModel} \epsilon(765,865) \quad : 2\text{개의 모델을 선택}$$

$$\epsilon(765,865) \rightarrow^{2Model} \quad \epsilon(\lambda,865)$$

$$\rho_{as}(865) \rightarrow^{\epsilon(\lambda,865)} \rho_{as}(\lambda)$$

$$\rho_{as}(\lambda) \rightarrow^{2Model} \rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda)$$

여기서 N은 사용된 에어로졸 모델의 개수인데, NASA 표준 대기보정 알고리즘에서는 12개의 모델이 사용되었다. 이 알고리즘은 우선 근적외선 영역(765, 865 nm)에서의 ρ_w는 0이라 가정한 후, 에어로졸의 단산란 (ρ_{as})을 이용하여 12개의 모델에 대하여 $\epsilon(765,865)$을 구하여 평균값을 이용하여 가장 근접한 값을 가지는 2개의 에어로졸 모델을 선택한다. 이러한 방법은 765와 865 nm에서 에어로졸 모델에 대하여 다중 산란이 거의 비슷하고 레일레이 산란의 효과가 매우 약하므로 ρ_{ra}가 매우 작게 되어 $\epsilon(765,865)$는 에어로졸 모델에 관계없이 구하고자 하는 올바른 값에 가깝다 (Gordon *et al.*, 1994). 이렇게 구한 2개의 모델 사이에 내분 비율을 구하여 다른 파장에 대한 $\epsilon(\lambda,865)$을 구하게 된다. $\epsilon(\lambda,865)$의 정의로부터 $\rho_{as}(\lambda)$를 구하고, $\rho_{as}(\lambda)$와 $\rho_a(\lambda)+\rho_{ra}(\lambda)$의 선형적인 관계로부터 에어로졸의 다중 산란 효과를 구해내어 해수로부터의 $\rho_w(\lambda)$을 구해내게 된다 (Wang, 1991; Gordon, 1997).

SeaWiFS 알고리즘은 앞으로도 많은 연구를 통해 검증이 필요하지만 현재 대기보정에 있어 가장 모범적인 방법을 제시하고 있다. 하지만 이 알고리즘은 765 nm에서 산소 분자에 의한 흡수 효과를 고려해야 하는 문제를 가지고 있다.

라. OCTS 대기보정 알고리즘

OCTS는 1996년에 발사되어 1997년까지 짧은 기간 동안 운행되었으나 많은 자료를 관측하였다. OCTS는 시기적으로 SeaWiFS보다 먼저 올라갔으나 SeaWiFS에서 사용하기 위해 제시된 알고리즘을 기본적으로 채용하였다. OCTS는 SeaWiFS와 비슷하게 가시광선 영역에서 6개의 밴드 (412, 443, 490, 520, 565, 670 nm)와 근적외선 영역에서 2개의 밴드(765, 865 nm)를 가지고 있다.

앞에서 언급했듯이 OCTS 알고리즘은 기본적으로 SeaWiFS의 알고리즘과 동일하다. 다만 에어로졸 모델이 다르고, 에어로졸 모델을 선택하기 위해 필요한 변수를 조금 다르게 사용하고 있다. 우선 OCTS에서는 SeaWiFS와 다른 황사를 포함하는 10가지 에어로졸 모델을 가지고 있다. 또한, 가장 근접한 2개의 에어로졸 모델을 택하기 위해 새로운 변수 $\gamma'_{ave}(670,865)$와 $\gamma(i,\lambda,865)$을 다음과 같이 도입하였다.

$$\gamma'_{ave}(670,865) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\gamma'(i,670,865) \tag{3.17}$$

$$\gamma(i,670,865) \equiv \frac{K_{ext}(i,\lambda)}{K_{ext}(i,865)} \tag{3.18}$$

여기서, $\gamma'(i,670,865) = \tau_a(i,670)/\tau_a(i,865)$이다. i는 에어로졸 모델을 의미하고 N은 에어로졸의 개수를 의미한다. $K_{ext}(i,\lambda)$는 에어로졸 모델과 파장에 따른 분산 계수(extinction coefficient)이다. 따라서 OCTS 대기보정 알고리즘에서는 10개의 에어로졸 모델에 대하여 $\gamma'_{ave}(670,865)$을 구하여 에어로졸 모델에 따라 미리 계산된 $\gamma(i,\lambda,865)$에서 가장 근접한 2개의 모델을 택하고, 그 내분 비율을 이용해서 에어로졸 광학적 두께를 계산해 냄으로서 에어로졸 다중 산란 효과를 계산해낸다. 이 알고리즘에서 765 nm 대신 670 nm를 사용한 것은 SeaWiFS 알고리즘에서 지적한 바와 같이 765 nm의 파장이 산소 분자에 의해 흡수되기 때문이다.

3. GOCI 대기보정 알고리즘

가. Spectral shape matching mathod (SSMM : CASE-II water atmospheric correction algorithm)

수정된 SSMM 대기보정 모델은 reflectance 값 대신에 radiance값으로 시작한다. 그러므로 각 밴드들의 중심파장이 i 인 TOA로부터 SeaWiFS에 의해 얻어진 총 신호는 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$L_T(\lambda_i) = L_{path}(\lambda_i) + t_{(s-o)}L_{sg}(\lambda_i) + t_{(o-sn)}L_{wc}(\lambda_i) + t_{(o-sn)}L_w(\lambda_i) \tag{3.19}$$

여기서 $L_T(\lambda_i)$는 TOA에서의 총 radiance이고, $L_{path}(\lambda_i)$는 path radiance 로 대기에서의 산란과 바다표면에서의 산란에 의한 스펙트럴 반사에 의한 값이다. $L_{sg}(\lambda_i)$는 바다표면에서의 sunglint radiance이며, $L_{wc}(\lambda_i)$는 바다표면의 whitecpas radiance 이다. 그리고 $L_w(\lambda_i)$는 우리가 얻고자 하는 water-leaving radiance이다. $t_{s-o}(\lambda_i)$ 과$t_{o-sn}(\lambda_i)$는 각각 태양에서 해수, 해수에서 센서로의 대기층의 투과율이다. t_{s-o}는 강한 풍속시를 제외하면 방향성을 갖는 sunglitter $L_{sg}(\lambda_i)$에 적당하고, t_{o-sn}는 water-leaving rardiance와 whitecap radiance가 거의 uniform angular 분포를 갖는 경우에 적당하다. GOCI의 관측영역은 sunglitter에 의해 크게 영향을 받지 않기 때문에 L_{sg}값은 무시해도 좋다. GOCI 영상에서의 whitecap 의 영향은 바다 표면의 풍속의 값을 포함하는 반사도 모델을 사용함으로서 계산될 수 있다 (Koepke, 1984). 그러나 관측값은 바다표면

풍속이 7-8 m s^{-1}보다 클 경우 표준 대기 보정 알고리즘에서 사용된 whitecap reflectance model이 큰 error값이 만들 수 있음을 보인다 (Gordon and Wang, 1994). 이는 결과적으로 water-leaving radiance값을 작게 유도한다. 이와 같은 잘못된 계산을 피하기 위해서 SSMM은 GOCI영상의 대기보정에서 L_{wc} 값을 무시한다.

그러므로 식(3.19)은

$$L_T(\lambda_i) = L_{path}(\lambda_i) + t_{(o-sn)} L_w(\lambda_i) \tag{3.20}$$

여기서 $L_{path(i)}$는 2개의 성분으로 다음과 같이 나뉜다.

$$L_{path}(\lambda_i) = L_{ra}(\lambda_i) + L_{as}(\lambda_i) \approx \gamma_{ra}(\lambda_i) + \gamma_{as}(\lambda_i) \tag{3.21}$$

$L_{ra}(\lambda_i)$는 에어로솔에 존재하는 공기 분자에 의한 single scattering 과 multi scattering에 의한 Rayleigh radiance이다. $L_{as}(\lambda_i)$는 공기 입자에서의 에어로솔 입자에 의한 single scattering 과 multiple scattering에 의한 aerosol radiance 이다. $g_{ra}(\lambda_i)$ 는 Rayleigh factor이고 , $g_{as}(\lambda_i)$는 aerosol factor (g-factor is relative to radiance)이다.

간략화하기 위하여, 분자와 에어로솔 산란 사이의 복잡한 항들은 이 대기 보정 체계에서 무시된다.

$L_{ra}(\lambda_i)$ 과 $L_{as}(\lambda_i)$의 정확한 추정을 위해서는 각 영상 획득시기의 aerosol type, optical thickness, air pressure, ozone optical thickness, wind, water vapor의 현장조사 자료를 요구한다. 그러나 이들 관측자료를 직접 얻기도 어려우며 radiative transfer 모델에 의해 얻어진 자료는 정밀도에서 의문시 된다 (Song et al., 2000). 더우기, 에어로솔의 산란과 흡수는 시공간적으로 다양하게 변하기 때문에 특성화하기 어렵고, 위성 자료의 대기보정에 많은 제약요소로 작용한다. 따라서, 대기의 광학적 특성을 모델링 하는 대신에 image-based SSMM 모델은 아래의 식과 같이 NIR2에서의 magnitude를 추정하기 위하여 두 개의 GOCI NIR band의 이점을 사용한다.

$$\gamma_{as}(\lambda_{NIR2}) = Q(\lambda_{NIR2}) \times (L_T(\lambda_{NIR2}), \Lambda(\lambda_{NIR1}, \lambda_{NIR2})) - (C \times \Phi_{(SS)}(\lambda_{NIR2})) \tag{3.22}$$

여기서 $g_{as}(\lambda_{NIR2})$는 λ_{NIR2} 파장의 스펙트럴 밴드에서 에어로솔 성분이고 L (λ_{NIR1}, λ_{NIR2})는 λ_{NIR1} 파장의 (L_T)과 λ_{NIR2} 파장의 (L_T)과의 비율이다. ($L_T(\lambda$

$_{NIR2}$), L(λ_{NIR1}, λ_{NIR2}))는 두개의 NIR band에서의 $L_T(\lambda_{NIR2})$과 L(λ_{NIR1}, λ_{NIR2})에 의한 값이다.. $L_T(\lambda_{NIR2})$는 λ_{NIR2} 파장에서의 전체 radiance이다. 그리고 $\Lambda_{(SS)}(\lambda_{NIR2})$ 는 λ_{NIR2} 에서의 부유퇴적물(SS)에 의한 후방산란에 의한 값이다.

두 개의 미지수 $Q(\lambda_{NIR2})$ 과 C는 각각 ($L_T(\lambda_{NIR2})$, L(λ_{NIR1}, λ_{NIR2}))과 $\Lambda_{(SS)}(\lambda_{NIR2})$에 의해 결정되어진다.

이것은 iterative convergence method에 의해 구해진다. $Q(\lambda_{NIR2})$는 aerosol type ($L_T(\lambda_{NIR2})$, L(λ_{NIR1}, λ_{NIR2}))에 의한 값이고 반면 C는 SS를 고려한 상수 값이다. $g_{as}(\lambda_{NIR2})$는 천해해역에서 SS에 의해 적은 양이지만 후방산란신호를 포함한다. $\Lambda_{(SS)}(\lambda_{NIR2})$는 visible band에서 외삽되어지기 전에 $g_{as}(\lambda_{NIR2})$로부터 추정되어지고 제거되어져야 한다. 이것은 visible band에서 water-leaving radiance를 보정한 결과가 된다. 이 과정을 하기 위해서, 먼저 aerosol-corrected radiance 는 λ_{NIR2} 파장에서의 TOA radiance로부터 첫번째로 계산된 aerosol factor(for which C $\Lambda_{(SS)}(\lambda_{NIR2})$ = 0) 를 제거함에 의해 얻어진다. aerosol-corrected radiance 영상의 계산된 히스토그램으로부터 $\Lambda_{(SS)}$ 의 값은 탁수 픽셀에 대하여 변수로서 인식되며 맑은 해역에서는 거의 0으로 정의된다. 이것은 식에서 C의 결정에 의해 얻어진다. 이는 aerosoλ factor $g_{as}(\lambda_{NIR2})$ 의 새로운 값을 얻기 위하여 식 (3.22)에 재적용됨에 의해 $\Lambda_{(SS)}(\lambda_{NIR2})$ 의 추정치를 유도한다. SeaWiFS 영상의 한 픽셀로부터 계산되어진 aerosol factor는 그 픽셀의 aerosol radiance에 비례하며 대기 에어로졸의 산란의 추가적인 영향을 설명한다. 그러므로 추정된 에어로졸 요인 $g_{as}(\lambda_{NIR2})$는 외삽되어지고 가시광 밴드에서 제거된다. 이 과정은 iterative convergence method에 의해 만들어진 aerosol spectral model의 lookup table를 사용함으로서 수행된다. 단순하게 $Q(\lambda_i)$를 곱해준 에어로졸 factor인 $g_{as}(\lambda_{NIR2})$는 아래의 식에 따라 중심 파장이 λ_i 인 visible spectral band 의 $g_{as}(\lambda_i)$의 값을 얻는다.

$$\gamma_{as}(\lambda_i) = Q(\lambda_i) \times \gamma_{as}(\lambda_{NIR2}) \tag{3.23}$$

만약 aerosol type의 공간 규모가 100~1000km이거나(Hu et al., 2000) 1000km 이상일 경우 aerosol factor는 SeaWiFS 의 8개 스펙트럴 밴드에 의해 관측된 aerosol concentration에 의해 하나의 픽셀로부터 다른 픽셀로 다양하게 변할 것이다. 식 (3.23)를 사용하면, aerosol radiance 는 계산되고 $L_T(\lambda_i)$로부터 뺄 수 있다. 여기서 $L_T(\lambda_i)$는 다음식과 같이 aerosol -corrected radiance 인 $L_{ac}(\lambda_i)$로부터 유도된다.

$$L_{ac}(\lambda_i) = (L_T(\lambda_i) - L_{as}(\lambda_i)) = L_{ra}(\lambda_i) + t_{(o-sn)} L_w(\lambda_i) \quad (3.24)$$

aerosol 과 다르게 Rayleigh 산란 성분은 공간적으로 거의 안정하다(Gordon and Wang, 1994). 따라서 간단한 선형 방정식을 사용하여 $L_{ac}(\lambda_i)$으로 부터의 근사치를 구할 수 있다.

SSMM은 맑은 해역의 water-leaving radiance의 스펙트럼 형태는 조류와 해저순환에 의해 탁해진 연안수와 비교하여 매우 안정적임을 가정한다. 측정된 해수의 water-leaving radiance를 이용하여 $L_{ac}(\lambda_i)$로부터 $L_{ra}(\lambda_i)$를 추출한다.

$$L_{ra}(\lambda_i) = L_{ac}(\lambda_i) - t_{(o-sn)} L_{w(clear)}(\lambda_i) \quad (3.25)$$

상대적으로 맑은 해수의 in-situ water-leaving radiance match-up은 식(3.25)에 의해 한 지점에서 계산된 $L_{ra}(\lambda_i)$의 처음 추정치를 만드는데 사용될 수 있다. in-situ water-leaving radiance 는 후에 언급될 표준 방법으로부터 추출된 $t_{o\text{-}sn}(\lambda_i)$를 사용하여 TOA로 변환된다. Gould and Arnone (2002)는 $L_{path}(\lambda_i)$을 산정하기 위해$L_T(\lambda_i)$ 와$L_{w(clear)}(\lambda_i)$의 차이를 추출하는 방정식을 제안한 바 있는데, $L_{path}(\lambda_i)$는 상수로서 전체 영상에 적용가능하며 대기(Rayleigh and aerosol scattering, and possibly surface reflection)는 전체 영상에서 균질하다고 가정하였다. 이는 항공센서인 Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI)와 같이 낮은 고도를 갖는 센서에 유효하나 넓은 지역을 관측하는 극궤도 위성자료에는 효과적이지 못하다. GOCI 영상의 픽셀에 대하여 Lra 성분의 영향을 파악하기 위해서는 $L_{ra}(\lambda_i)$ 와 $L_{ac}(\lambda_i)$의 관계를 이용한 일련의 단순 선형 방정식이 유도되어져야 한다.

$$\gamma_{ra}(\lambda_i) = \alpha[L_{ac}(\lambda_i)] + \beta \approx L_{ra}(\lambda_i) \quad (3.26)$$

Rayleigh factor $g_{ra}(\lambda_i)$는 Rayleigh radiance에 비례하며 λ_i 에서 관측된 신호의 magnitude에 의해 한 픽셀에서 다른 픽셀로 변한다. 각 band에 대한 경험적 계수인 a, b는 Table1에 주어진다 (GOCI 발사 후에 수정/보완될 예정임). 이러한 계수들은 정오 전후에 얻어진 자료와 한국과 중국의 연안과 같이 서로 다른 해수 타입에서 얻어진 SeaWiFS 측정값에 대하여 더욱 잘 맞는다. 이제 식 (3.21)~(3.26)을 식 (3.20)로 바꾸어 다음과 같이 water-leaving radiance를 산출한다.

$$L_w(\lambda_i) = \frac{[L_T(\lambda_i) - L_{ra}(\lambda_i) - L_{as}(\lambda_i)]}{t_{(o-sn)}(\lambda_i)} \quad (3.27)$$

식 3.19~3.27에서 해수 표면으로부터 센서까지 water-leaving radiance전파시키고 산란과 흡수에 의해 야기되는 복합적 효과를 갖는 $t_{o\text{-}sn}(\lambda_i)$(atmospheric diffuse transmittance)는 $t_{o\text{-}sn}(\lambda_i)L_w(\lambda_i)$로부터 $L_w(\lambda_i)$ 까지의 water-leaving radiance를 복구시키기 위하여 정밀하게 산출되어져야 한다. 그러나, 일반적으로 투과에 의한 multiplicative 효과에 대한 정밀한 보정은 대기의 광학 두께에 대한 현장조사 자료를 요구한다 (Moran et al., 1992). 여기서 대기의 광학 두께는 각 위성이 관측하는 동안 항상 실제로 관측하기 어렵기 때문에 가시광선 파장의 다른 스펙트럴 밴드와 다른 대기조건에 의해 계산된 평균의 투과율이 위성자료의 대기보정에 사용되어진다 (Chavez, 1996; Wu et al., 2005). SeaWiFS 용의 현재 SAC체계는 exponential fitting을 이용한 25,000 개의 시뮬레이션 데이터를 포함하는 표로부터 $t_{o\text{-}sn}(\lambda_i)$의 가장 근사치를 산출한다.

$$t_{(o-sn)}(\lambda_i, \theta) = X(\lambda_i, \theta)\exp[-Y(\lambda_i, \theta)\tau_{as}(\lambda_i)] \quad (3.28)$$

$X(\lambda_i,q)$ 와 $Y(\lambda_i,q)$은 SeaWiFS 의 8개의 스펙트럴 밴드에 대한 계수로 12 aerosol model 그리고 다양한 태양각과 시야각 에 대한 정보를 포함한다. $t_{as}(\lambda_i)$는 에어로솔 광학 두께이다. 표로부터 얻은 $t_{(o\text{-}sn)}(\lambda_i,q)$는 0.1%의 정확도를 가진다. (Wang, 1999). 추출해낸 water-leaving radiance는 식 3.29을 사용하여 반사도로 변환할 수 있다.

$$\rho(\lambda_i) = \frac{\pi L(\lambda_i)}{F_0(\lambda_i)\cos\theta_0} \quad (3.29)$$

Lw(λi)는 water-leaving radiance로 $\Lambda_0(\lambda i)$는 대기권 밖의 solar irradiance 의 평균 값이고 q0 는 solar zenith angle이다. 이 반사도는 remote-sensing reflectance 와 비교하기 위하여 p steradians에 의해 나누어진다. : 1/p ρ (λ) Rrs(λ). Figure 3.4은 GOCI의 연안해역에서 water-leaving radiance 와 chlorophyII concentration얻기 위한 전체적인 대기보정 흐름도이다.

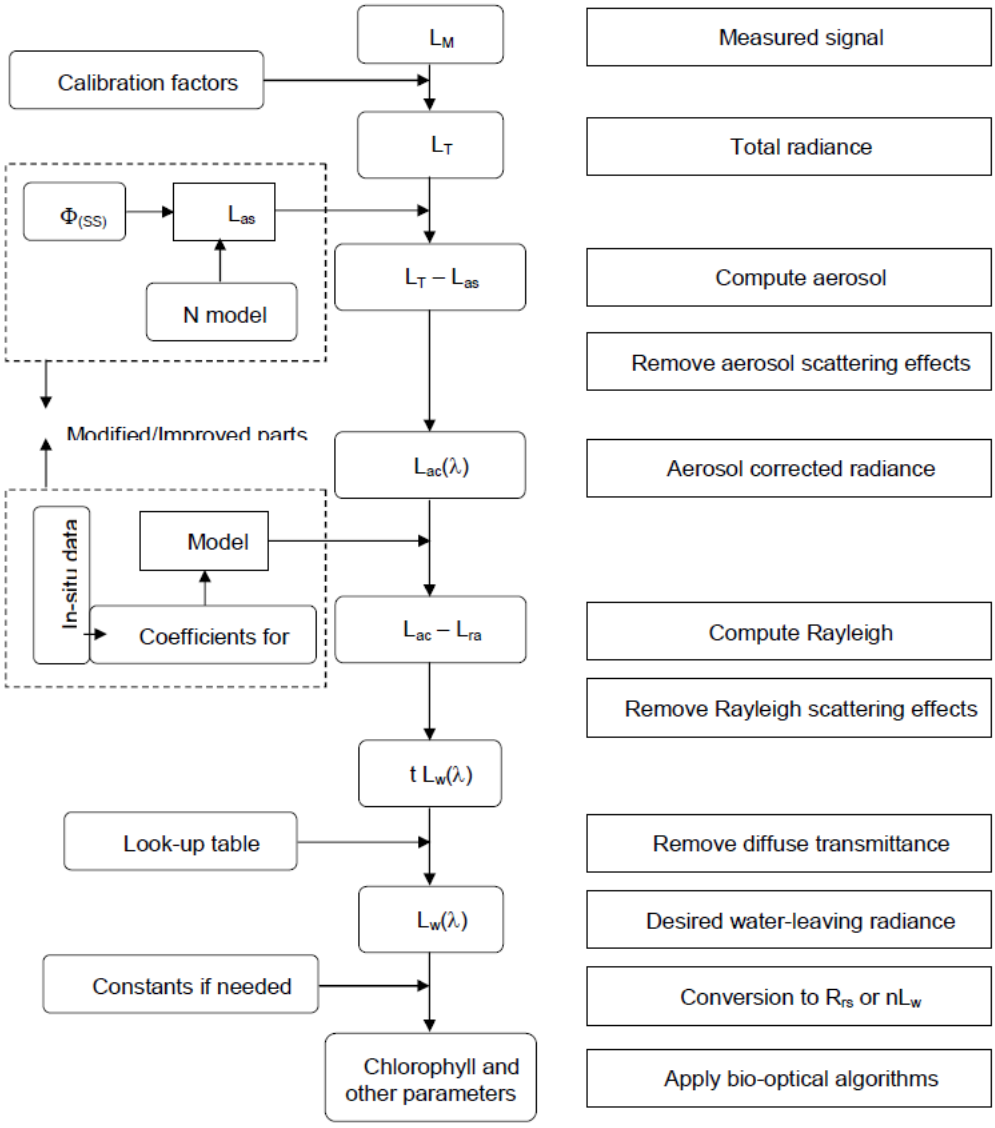

Figure 3.3 Flowchat of the SSMM atmospheric correction scheme to retrieve water-leaving radiance and chlorophyll concentration from GOCI data in coastal waters (from Shanmugam and Ahn, 2007).

Table 3.3 Coefficients for computing the Rayleigh factor $\gamma_{ra}(\lambda_i)$ in the SeaWiFS spectral bands. For GOCI new coefficients will be provided after its launch

Bands (nm) / Coefficients	412	443	490	510	555	670	765	865
α	0.1020	0.1296	0.1524	0.1200	0.0775	0.0217	0.0040	0.0020
β	8.1103	7.3896	5.4256	4.4509	2.9344	1.1817	0.5240	0.270

제 6 절 연구결과

1. 해수분광측정기와 SeaWiFS 자료의 비교 및 분석

2003년 10월부터 2006년 12월까지 이어도 종합해양과학기지에서 측정된 광자료와 시기가 일치하는 SeaWiFS 자료와의 수출 광량을 비교함으로서 SeaDAS를 이용한 SeaWiFS 표준 대기보정 알고리즘을 검정하였다. Figure 3.4는 이어도 종합해양과학기지에 설치된 분광기인 HyperSAS와 SeaWiFS의 수출광량을 밴드별로 비교한 것이다. 이러한 분포의 경향성을 D'Ortenzio et al.(2002)에서의 에러 퍼센트를 이용, 수치화하여 나타냈으며 Table 3.4에 정리하였다.

$$\%E = 100\left|\frac{C_{HyperSAS} - C_{SeaWiFS}}{C_{HyperSAS}}\right| \tag{3.30}$$

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

Table 3.4 Results of statistical analysis for water-leaving radiance of HyperSAS and SeaWiFS.

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 minium, maximum, and average of %E, respectively. %S is the standard deviation of %E. r^2 is the correlation coefficient.

Figure 3.4과 Table 3.4에서 보면, SeaWiFS 밴드 1과 2의 중심파장대인 412 nm와 443 nm 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)은 단파장대에서 검정 결과가 안 좋은 것을 SeaDAS의 흡광 에어로졸 모델의 문제로 판단한 바 있다. SeaWiFS 밴드 3-5까지에 해당하는 490, 510과 555 nm 영

역에서는 에러 퍼센트가 7-9 % 정도로 단파장대에 비해 상당히 낮게 나타났지만 SeaWiFS 수출광량의 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 해수출광량의 세기도 다른 밴드들에 비해 강하게 나타나는데, 555 nm의 상한값들인 두 점들을 제외하면 SeaWiFS 밴드 3.5의 평균 해수출 광량은 2-3 $mW/cm^2/um/sr$ 정도의 값을 보였다. 이후 SeaWiFS 밴드 6-8까지의 장파장대로 갈수록 점점 높은 에러 퍼센트를 보였으며, 865 nm 영역에서는 70 %, 상관계수는 0.32 정도로 매우 낮은 상관관계를 보였다. 특히 SeaWiFS의 해수출 광량이 0.1 $mW/cm^2/um/sr$ 미만으로 매우 낮은 값을 보인 반면 이어도 종합해양과학기지에서 측정된 값은 0.3 $mW/cm^2/um/sr$ 정도의 범위를 보여 많은 차이를 나타냈다. 따라서 400nm 대에서는 단파장으로 갈수록 그리고 600 nm 이후 영역에서는 장파장으로 갈수록 두 자료간의 차이가 심했으며, 500 nm 전후 영역에서는 상대적으로 차이가 적게 나타났다.

Figure 3.5은 모든 밴드의 수출광량 값들을 하나의 그래프로 비교한 것으로 여기서 보면, 장파장대 밴드에서는 물에 의한 흡광이 거의 없으므로 위성자료에서는 해수출 광량 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 것으로 나타났다. 전 밴드 영역에 대해서 HyperSAS의 자료가 SeaWiFS보다 높은 값을 보였으며, 전체적으로는 두 자료간에 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

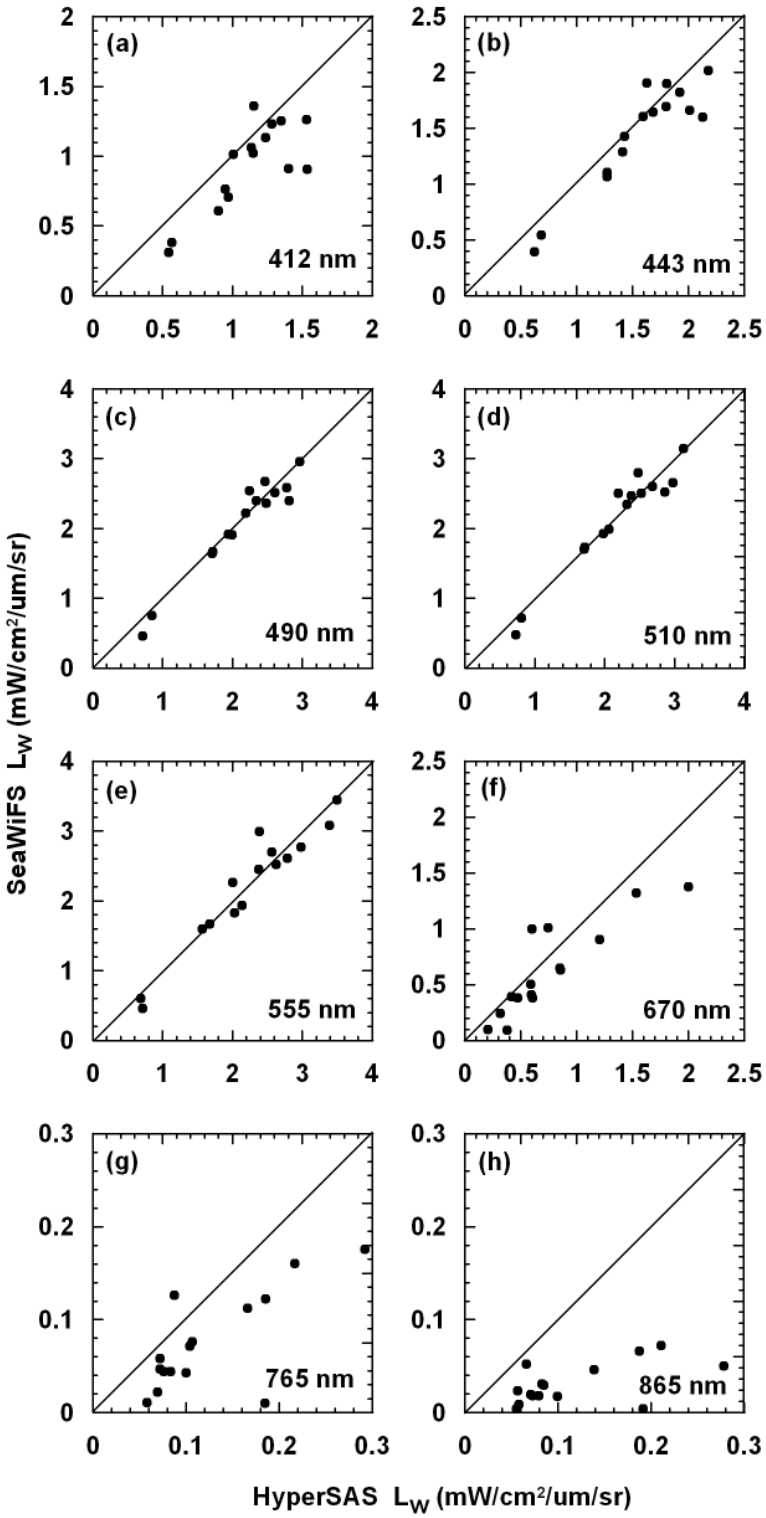

Figure 3.4 Comparison of band's water-leaving radiance for HyperSAS and SeaWiFS (a) 412 nm (b) 443 nm (c) 490 nm (d) 510 nm (e) 555 nm (f) 670 nm (g) 765 nm (h) 865 nm

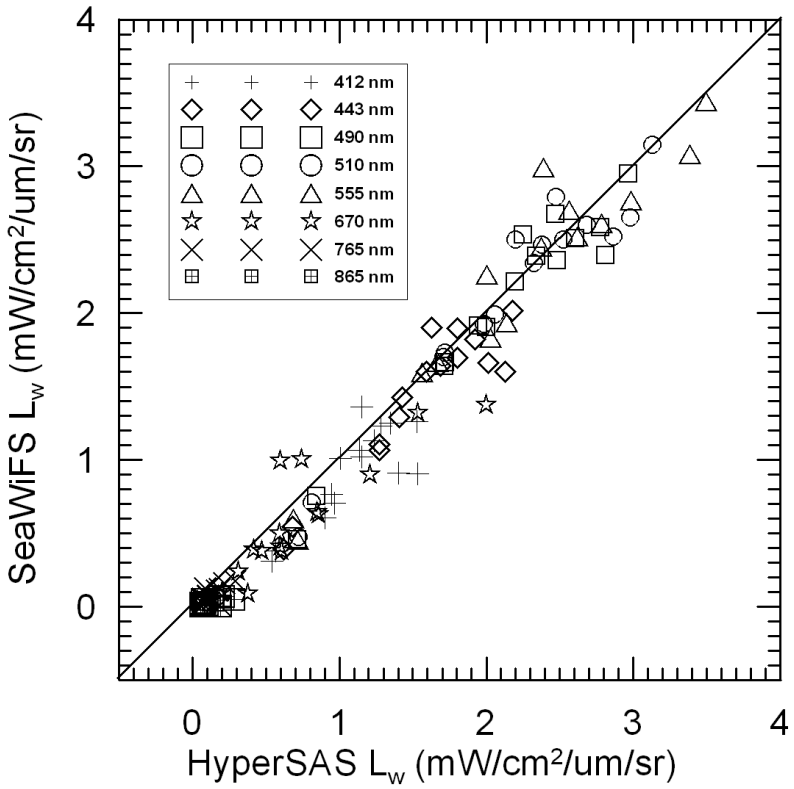

Figure 3.5 Comparison of HyperSAS's L_w and SeaWiFS's L_w

Figure 3.6는 2003년부터 2004년까지 시기별 관측된 이어도 종합해양과학기지의 HyperSAS 자료와 SeaWiFS 해색자료의 원격반사도(R_{rs}) 스펙트럼을 비교한 것이다. 값의 차이는 앞에서 그림과 에러 퍼센트로 비교하였으므로, 스펙트럼 형태만을 비교하기 위해 각 스펙트럼의 550nm 밴드를 기준으로 정규화(normalization) 하였다. (a)와 (d)는 각각 2003년 10월 29일과 2004년 3월 28일에 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 R_{rs} 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.

또한 대체적으로 추출밴드에 상관없이 SeaWiFS에서 얻은 R_{rs} 값은 HyperSAS에서 얻은 R_{rs} 값보다 항상 낮은 값을 형성하고 있었는데, 이것은 SeaWiFS 위성자료처리에 사용된 대기보정 알고리즘에 의해 R_{rs} 값이 과도하게 보정되었기 때문이라고 생각된다. 이러한 위성자료의 과도한 보정은 위성자료

를 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.

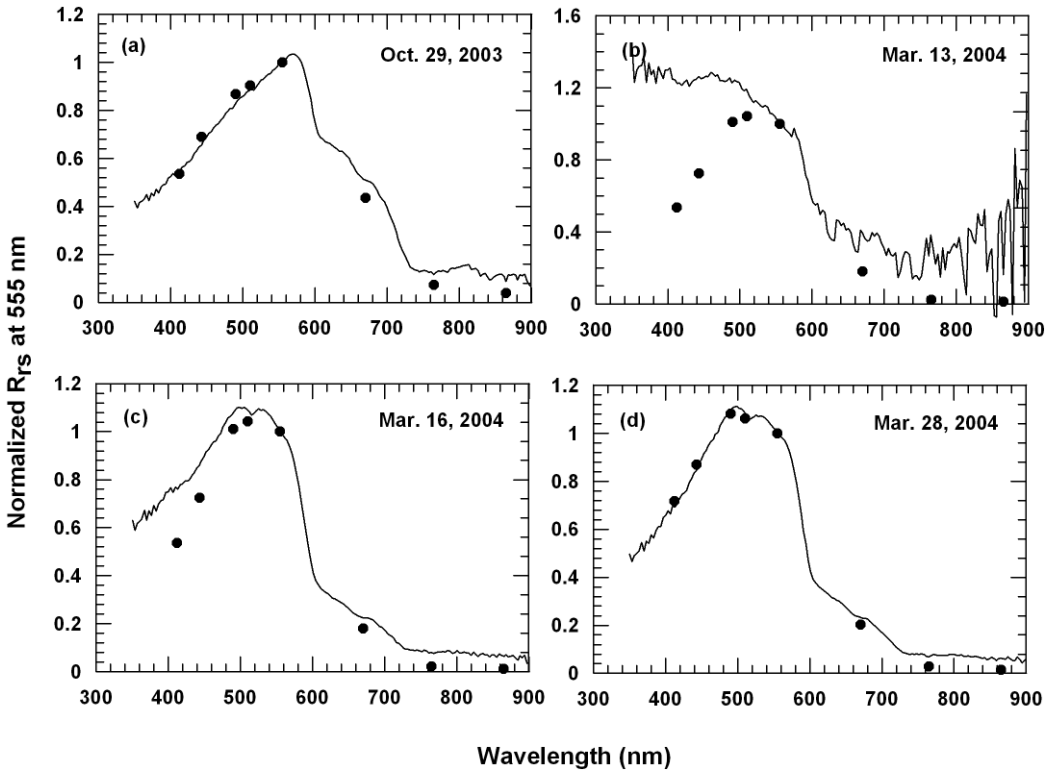

Figure 3.6 Comparison of spectrum type normalized Rrs at 555 nm for HyperSAS and SeaWiFS. (a) Oct. 29. 2003 (b) Mar. 13. 2004 (c) Mar. 16 2004 (d) Mar. 28 2004

2. 해수분광측정기와 MODIS 자료의 비교 및 분석

2003년 8월부터 2006년 8월까지 이어도 종합해양과학기지에서 측정된 광 자료와 시기가 일치하는 MODIS Aqua 자료와의 수출 광량을 비교함으로서 SeaDAS를 이용한 MODIS Aqua 대기보정 알고리즘을 검정하였다. Figure 3.7은 이어도 종합해양과학기지에 설치된 해수분광측정기인 HyperSAS와 MODIS Aqua의 수출광량을 밴드별로 비교한 것이다. 이러한 분포의 경향성을 D'Ortenzio et al.(2002)에서의 에러 퍼센트를 이용, 수치화하여 나타냈으며 Table 3.5에 정리하였다.

$$\%E = 100\left|\frac{C_{HyperSAS} - C_{MODIS}}{C_{HyperSAS}}\right| \quad (3.31)$$

여기서, $C_{HyperSAS}$와 C_{MODIS}는 각각 HyperSAS와 MODIS Aqua에서 산출된 밴드별 수출광량 값이다.

Table 3.5 Results of statistical analysis for water-leaving radiance of HyperSAS and MODIS Aqua.

MODIS Aqua Wavelength (nm)	412	443	488	531	551	667	678	748	869	Total
$\%E_{min}$	9.77	0.32	5.69	1.18	0.59	17.74	18.44	2.72	20.97	
$\%E_{avg}$	37.74	28.25	20.73	17.22	16.06	40.23	39.83	60.58	62.32	35.88
$\%E_{max}$	87.51	70.35	84.22	66.72	45.28	63.51	64.48	97.75	98.86	
%S	21.35	19.03	21.10	18.23	14.59	17.69	16.48	28.95	24.54	
r^2	0.69	0.88	0.94	0.96	0.96	0.92	0.92	0.82	0.79	
RMS	0.309	0.153	0.108	0.099	0.098	0.272	0.264	0.817	0.840	

$\%E_{min}$, $\%E_{max}$ and <%E> are the %E minium, maximum, and average of %E, respectively. %S is the standard deviation of %E. r^2 is the correlation coefficient.

Figure 3.7과 Table 3.5을 함께 보면, 412 nm와 443 nm의 단파장대에서는 해수분광측정기인 HyperSAS가 위성자료인 MODIS Aqua보다 측정값이 높게 나타났다. 이것은 단파장대에서의 해수 고유의 산란특성에 의한 것으로, SeaWiFS와 동일하게 SeaDAS에 사용된 흡광에어로졸 모델의 문제 때문에 단파장대에서의 검정결과가 좋지 않은 것으로 생각된다. 이때의 에러퍼센트는 각각 37과 28이고 RMS값도 각각 0.309와 0.153으로 비교적 높았다. 가시광영역인 488 nm, 531 nm, 551 nm에서는 에러퍼센트가 각각 20, 17, 16이고 RMS값도 각각 0.108, 0.099, 0.098로 나타났으며, 단파장대보다는 상당히 낮은 값들을 보였다. 엽록소의 형광파장대인 667 nm와 678 nm에서는 에러퍼센트가 각각 40과 39이고 RMS값도 각각 0.272와 0.264로 두 파장대가 서로 비슷하였고, 가시광영역보다는 상당히 높은 값들을, 단파장대와는 비교적 유사한 값들을 보였다. 대기보정 밴드들인 748 nm와 869 nm의 장파장대에서는 에러퍼센트가 각각 60과 62이고 RMS값이 0.817과 0.840으로 상당히 높은 값을 나타냈다. 이것은 이론적으로 장파장대에서의 해수의 광신호가 "0"으로 규정되어 있어서

위성자료의 값들이 대부분 “0”으로 보정되지만, 실제로는 해수분광측정기와 유사한 분광기(spectroradiometer)로 해수를 측정하면 해역 및 해수의 광특성에 따라 조금씩 차이는 있지만 “0” 보다는 크지만 아주 미약한 해수 신호가 측정되므로 이와 같은 큰 차이를 보여준 것이다. 이러한 현상은 Figure 3.8에서 잘 표현되고 있다. Figure 3.8은 HyperSAS와 MODIS Aqua에 대한 모든 밴드의 수출광량 값들을 하나의 그래프로 비교한 것으로 여기서 보면, 장파장대 밴드에서는 물에 의한 흡수에 의해 해수출 광량 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 것으로 나타났다. 전 밴드 영역에 대해서 HyperSAS의 자료가 MODIS Aqua보다 높은 값을 보였으며, 전체적으로는 두 자료간에 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Table 3.4와 Table 3.5를 서로 비교해보면, 전반적으로 모든 밴드에서 MODIS Aqua가 SeaWiFS보다 비교적 높은 에러퍼센트 값을 나타냈다. 이것은 센서의 특성에 따른 차이와 센서 보정 및 대기보정 알고리즘 등 다양한 요인에 의해 발생된 것으로 생각되며, 추후 Cross Calibration에 의한 심도 깊은 연구가 요구된다.

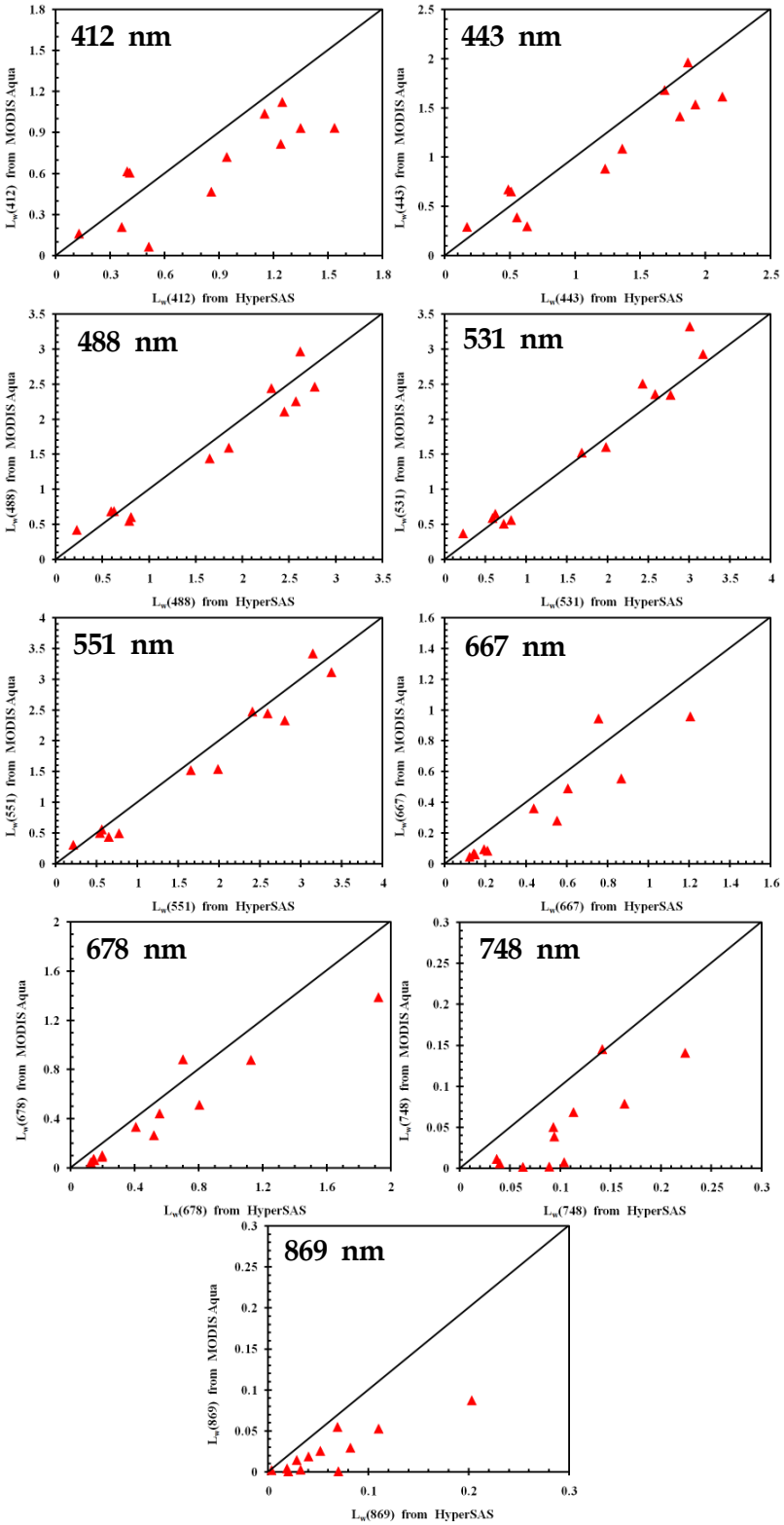

Figure 3.7 Comparison of band's water-leaving radiance for HyperSAS and MODIS Aqua.

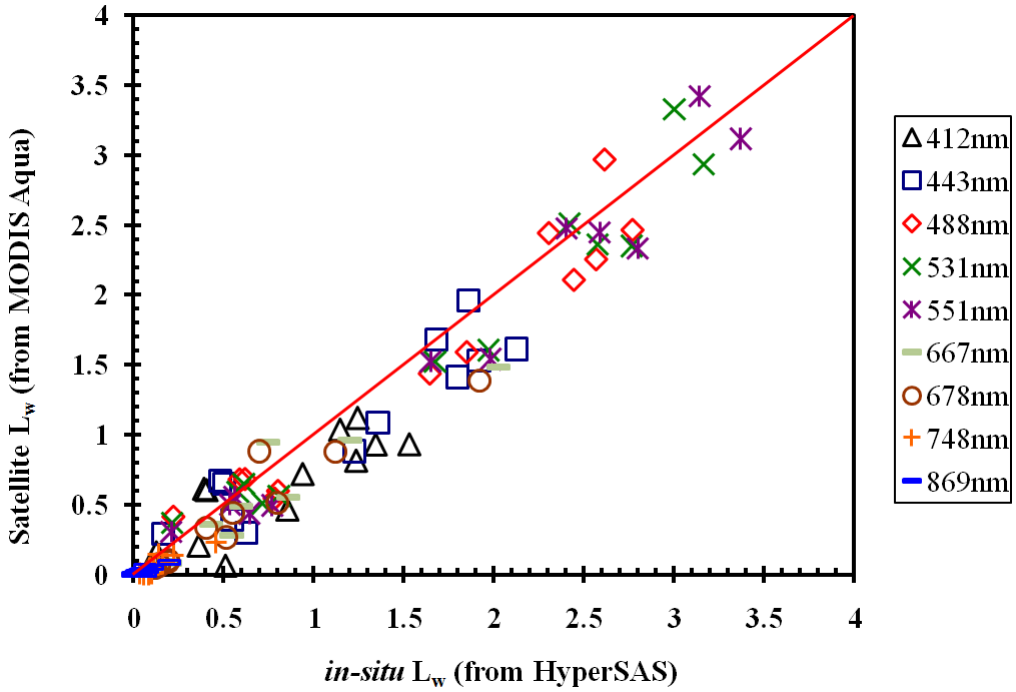

Figure 3.8 Comparison of HyperSAS's L_w and MODIS Aqua's L_w

3. GOCI 대기보정 알고리즘으로부터 산출된 L_w와 해수분광측정기 및 SeaWiFS 자료 비교

GOCI는 세계 최초의 정지궤도 해색위성으로 2009년 9월경에 발사될 예정이며 우리나라의 두 번째 해색위성이다. GOCI에 사용될 새로운 대기보정 알고리즘은 한반도 주변 해역 및 대기의 특성을 최대한 고려하여 개발된 알고리즘으로 이것을 SeaWiFS 위성자료에 적용하여 산출한 L_w와 이어도 종합해양과학기지에 설치된 해수분광측정기 자료 및 SeaWiFS 자료를 상호 비교하였다(Figure 3.9). Figure 3.9의 (a)는 2003년 10월 29일 관측자료인데, GOCI 대기보정 알고리즘으로부터 산출된 L_w 값은 장파장대를 제외한 나머지 밴드들에서 표준 대기보정 알고리즘이 적용된 SeaWiFS 자료보다 상당히 낮게 추정되었다. 실제 관측자료인 HyperSAS의 밴드별 L_w 값들은 GOCI 대기보정 알고리즘의 L_w 값보다 SeaWiFS의 L_w 값에 훨씬 근접하였다. Figure 3.9의 (b)는 2006년 4월 20일 관측자료인데, GOCI 대기보정 알고리즘으로부터 산출된 L_w 값은 모든 파장대에서 SeaWiFS의 L_w 값보다 상당히 높게 추정되었다. 특히 장파장대에서 SeaWiFS와 HyperSAS의 L_w 값은 거의 "0"에 근접한 값이었지만 GOCI 대기보정 알고리즘의 L_w 값은 "0"보다 상당히 큰 값을 산출하였다.

Figure 3.10은 GOCI 대기보정 알고리즘의 L_w와 HyperSAS의 L_w와 SeaWiFS

의 L_w의 스펙트럼들의 형태를 파장 555 nm을 기준으로 규격화하여 비교한 그림들이다. Figure 3.10의 (a)는 2003년 10월 29일 관측자료로, GOCI 대기보정 알고리즘의 L_w와 HyperSAS의 L_w와 SeaWiFS의 L_w의 스펙트럼 모두가 유사한 모양을 나타냈다. Figure 3.10의 (b)는 2006년 4월 20일 관측자료로, HyperSAS의 L_w와 SeaWiFS의 L_w의 스펙트럼 모양은 비슷하였지만, GOCI 대기보정 알고리즘의 L_w의 스펙트럼 모양은 전혀 다른 형태를 나타냈다.

이와 같이, GOCI 대기보정 알고리즘으로부터 추정된 밴드별 L_w 값과 스펙트럼 모양들이 SeaWiFS 또는 HyperSAS의 Lw 값과 스펙트럼 모양들과 조금씩 차이를 보인 것은 사용된 GOCI 대기보정 알고리즘의 자체적인 오류 혹은 사용된 에어로졸 타입에 따른 입력값의 오류 등에 의한 것으로 생각되며 추후 심도 깊은 연구가 수행되어야 할 것이다.

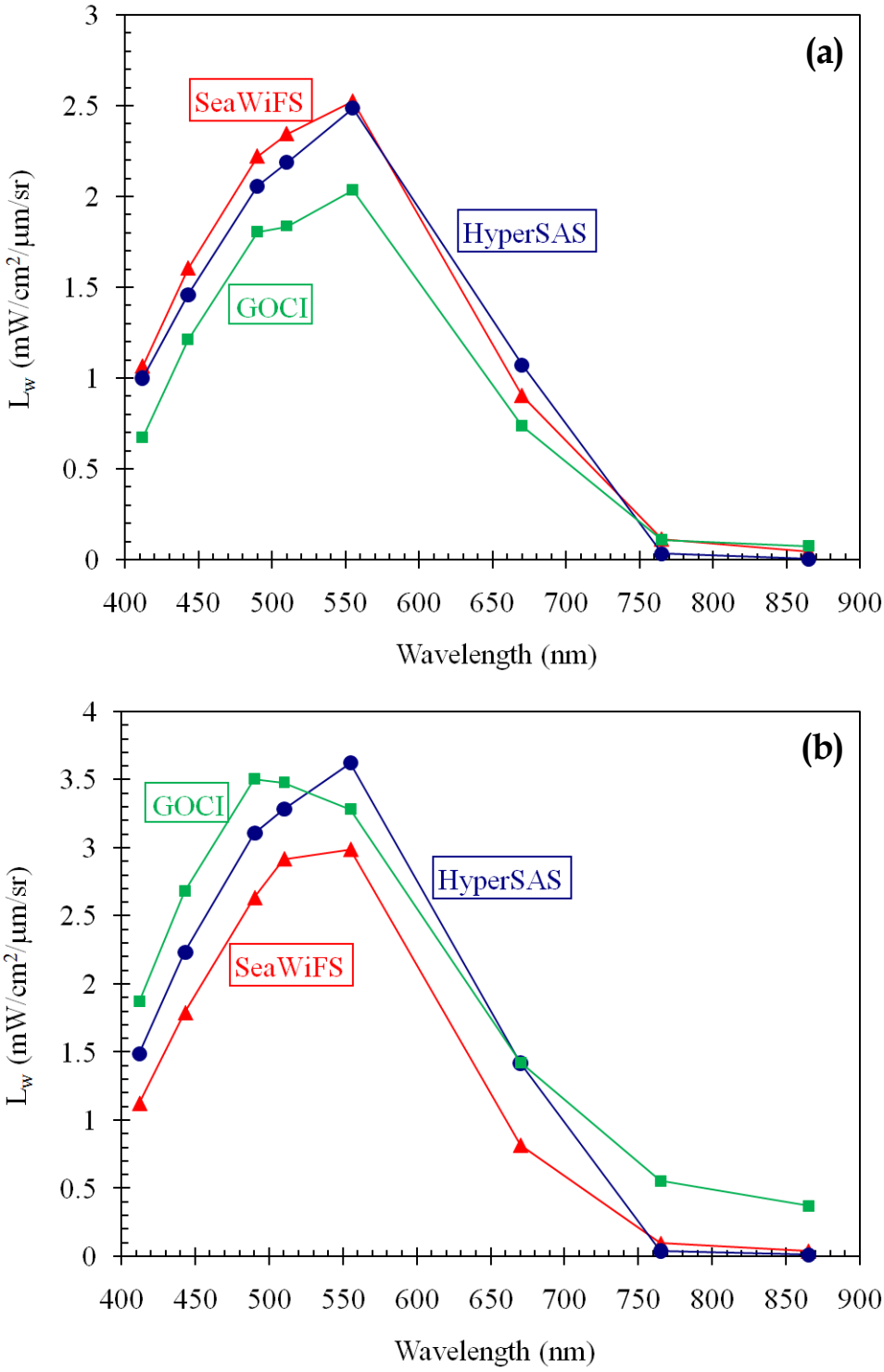

Figure 3.9 Comparison of L_w obtained from in-situ observation (HyperSAS), L_w obtained from standard atmospheric correction algorithm (SeaWiFS), and Lw obtained from GOCI atmospheric correction algorithm (GOCI). Used satellite data are SeaWiFS data. (a) Oct. 29. 2003 (b) Apr. 20. 2006

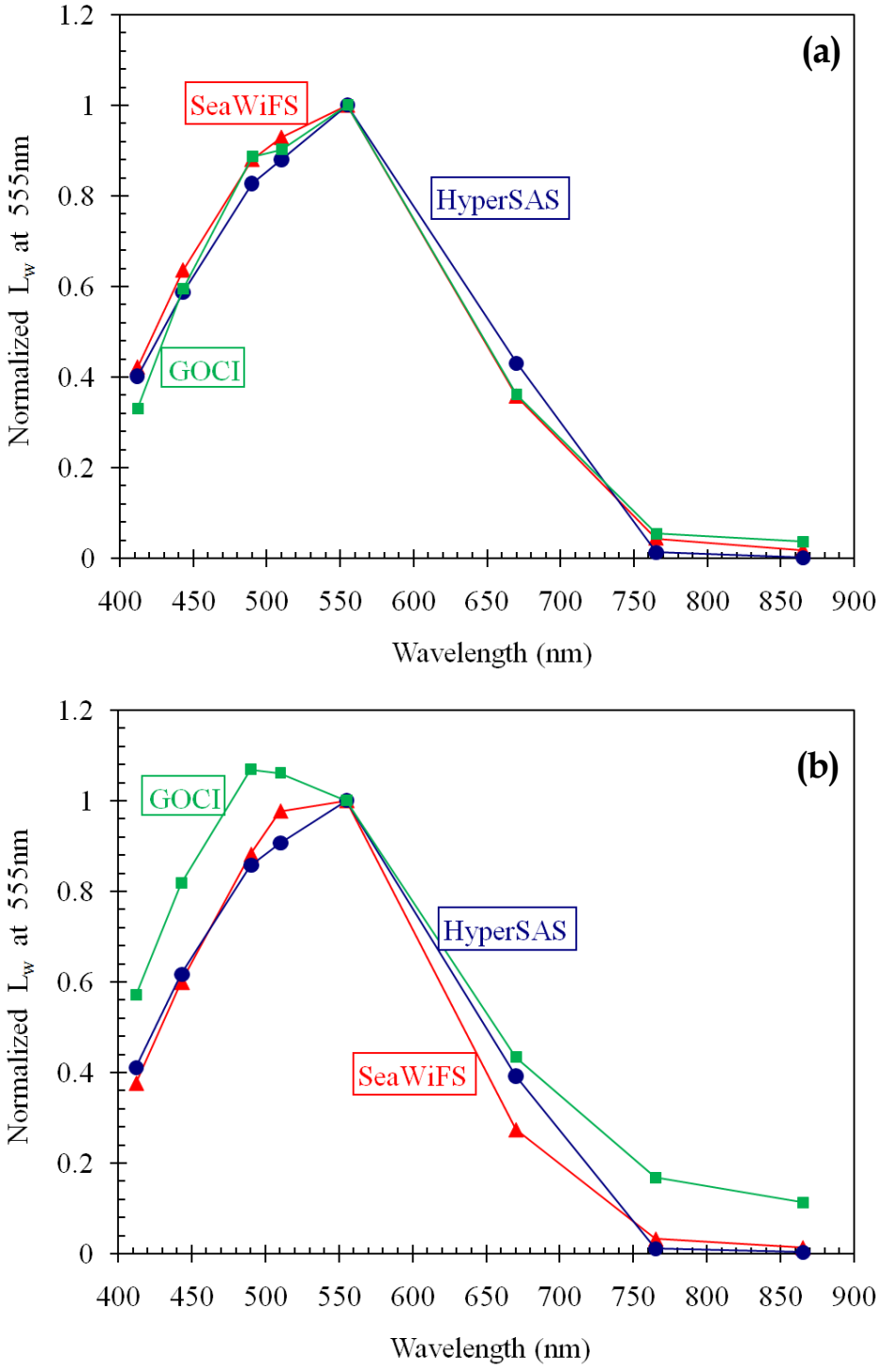

Figure 3.10 Comparison of spectrum types normalized L_w at 555 nm. HyperSAS means to be obtained from in-situ observation, SeaWiFS means to be obtained from standard atmospheric correction algorithm, and GOCI means to be obtained from GOCI atmospheric correction algorithm. Used satellite data are SeaWiFS data. (a) Oct. 29. 2003 (b) Apr. 20. 2006

제 7 절 결론 및 고찰

이어도 종합해양과학기지의 해수분광측정기와 MODIS Aqua의 전 밴드에서 얻어진 L_w(water-leaving radiance, 수출광량)을 비교한 결과 평균 35 % 정도의 에러 퍼센트를 보였다. 또한 SeaWiFS의 전 밴드에서 얻어진 수출 광량과의 비교 결과에서는 평균 25 % 정도의 에러 퍼센트를 보였다. 이것은 NASA에서 요구하는 수출광량의 절대오차 5 %에 비하면 5 - 7 배의 상당히 높은 수치이다. 이와 같은 차이의 주된 원인은 SeaDAS에서 제공하는 표준 대기보정 방법이 맑은 대양의 해수 특성을 고려하여 만들어졌기 때문으로 생각된다. 표준 대기보정 방법은 근적외선 영역 (765와 865 nm)에서의 수출광량은 0 이라고 가정한 후, 에어로졸의 단산란을 이용하여 12개 에어로졸 모델 중 2개의 에어로졸 모델을 선택한다. 이러한 방법은 765와 865 nm에서 에어로졸 모델에 대하여 다중 산란이 거의 비슷하고 레일레이 산란의 효과가 매우 약하므로 에어로졸 모델에 관계없이 참값에 가깝게 되는 원리를 이용한 것이다. 이렇게 구한 두 개의 모델 사이에 내분 비율을 구하여 다른 파장에 대한 입실론 값을 구하게 된다. 이 알고리즘은 765 nm에서 산소분자에 의한 흡수 효과가 고려되지 않은 것에 대한 문제를 갖고 있다 (Gordon et al., 1994). 따라서 MODIS Aqua의 35 %, SeaWiFS의 25 % 정도의 에러 퍼센트에서 대기보정 밴드를 포함하고 있는 MODIS Aqua의 15번와 16번 밴드와 SeaWiFS의 7번과 8번 밴드들의 절대오차 평균은 각각 61 % 와 49 % 정도로 발생하고 있으며, 이것은 표준 대기보정 방법의 가정인 근적외선 영역에서의 수출광량은 “0” 이라는 것에서 비롯된 것이다. 즉 실제로는 근적외선 영역에서도 적은 양의 수출광량이 측정되고 있으므로 이에 대한 사항을 고려한 보완된 대기보정 방법이 필요하며, 현재 진행되고 있는 연구를 통해 차후 논의될 것이다.

GOCI에 사용될 예정으로 개발된 새로운 대기보정 알고리즘을 SeaWiFS 위성자료에 적용하여 수출광량을 산출하였고, 이어도 종합해양과학기지의 해수분광측정 자료와 비교해보았다. 예상했었던 것보다 상당히 많은 오류를 유발하였으며 그 원인에는 사용된 대기보정 알고리즘의 자체적인 오류와 입력값으로 사용된 에어로졸 타입의 설정 등 다양한 요소들에 의한 것으로 생각되며 이에 대한 사항은 추후 수정/보완/발전시켜 나가야할 과제로 여겨진다.

이어도 종합해양과학기지에 설치된 HyperSAS 시스템은 우리나라 최초로 해수분광을 연속적으로 측정할 수 있는 시스템이다. 이와 같이 바다에 설치된 플랫폼 형태의 해양위성 검보정 사이트는 미국과 이태리가 공동으로 지중해에 설치한 CoASTs 이외에 선례가 없기 때문에 설치부터 유지보수 관련하여 많은 어려움이 있었다. 몇 년간의 시행착오를 거쳐 안정적으로 자료를 수신 받았으

나, 올해 또 고장이 나서 자료를 획득하지 못했다. 따라서 운영 노하우를 습득하고 설치된 해수분광기 자체의 검보정도 주기적으로 수행되어야 할 것이다. 또한, 해수 밖에서 측정하는 자료 외에 해수 중에서 측정할 수 있는 광학장비를 설치한다면 세계적인 해색위성 검보정 사이트로 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

또한 1998년 우리나라 최초의 해색센서인 OSMI를 다목적위성-1호에 탑재하여 발사한 이후, 2009년 9월경에는 세계 최초의 정지궤도 해양위성인 GOCI (Geostationary Ocean Color Imager)를 발사할 예정이다. 지금까지 위성선진국에서 발사한 해색위성들의 활용 현황을 보면, 하드웨어적으로 좋은 위성과 좋은 센서를 개발하는 것도 중요하지만, 위성자료에 대한 지속적 검보정 자료와 분석 방법의 업데이트 노력이 위성 활용도를 결정하였다. 따라서 우리나라도 위성의 개발과 함께 우리나라 주변 해역 특성에 맞는 해수분석 알고리즘 개발과 검보정 연구에 주력해야 될 것이다. 특히 GOCI 자료는 하루에 8번씩 자료를 받게 됨에 따라 시간별로 태양-지구-위성간의 위치가 계속적으로 바뀌게 됨으로 BRDF (bi-directional Reflectance Distribution Function) 문제가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해서는 매시간 관측된 해수의 분광특성곡선이 필요함으로 이어도 기지에서의 해수분광 측정 자료는 추후 GOCI의 해색 자료의 정밀도를 좌우하는 중요한 역할을 담당할 것으로 기대한다.

제 4 장 연구개발 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

당해연도에는 이어도 기지에 설치된 해수분광측정기 자료를 이용하여 국내에서 개발된 GOCI용 대기보정 방법과 NASA에서 개발된 대기보정 방법을 MODIS와 SeaWiFS 위성영상에 적용하여 정밀도를 검증하는 것이 목적이다. 또한 이어도 기지의 열적외선 측정기를 이용한 자료를 이용하여 NOAA AVHRR 자료의 정밀도를 검증하는 것이다. 그러나 기기들의 노후화로 인하여 자료를 정상적으로 받을 수 없어서 일부 연구목표를 변경되었다. 첫째, 해수분광측정기 자료가 2008년 정상적으로 수신되지 못해 기존에 받아 논 스펙트럼 자료를 활용하였으며, MODIS 자료를 분석함으로서 대기보정 후의 해수출광량이 위성의 차이에 의해 어떻게 달라지는지도 분석하였다. 둘째, 열적외선 측정기는 장비의 노후화로 자료를 못 받아 NOAA AVHRR의 자료 검증을 실시하지 못하였다. 장비는 새로운 장비로 교체될 예정이다. 따라서 NOAA 자료에 대한 30 % 정도의 공정을 이행하지 못하였으나, MODIS 해색위성을 추가 분석함으로서 업무량을 충족시키고자 하였다. 또한 미국 NOAA의 손승현 박사와 NOAA에서 새롭게 개발된 Case-2용 해색위성 대기보정 알고리즘을 비교하기 위하여 공동연구를 추진하고 있다.

Table 4.1 Research goal and viewpoint of the evaluation

구분	세부연구목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1 차년도 (2007)	SeaWiFS 대기보정방법 검정	60	시계열 이어도 자료와 SeaWiFS 자료의 수출광량이 비교/분석 되었는가?
	NOAA AVHRR 검정	40	시계열 이어도 자료와 NOAA AVHRR 자료가 비교/분석 되었는가?
2 차년도 (2008)	국내개발 대기보정 방법의 SeaWiFS 적용 및 검보정	70	국내개발 대기보정 방법이 기존의 방법보다 정밀도가 향상되었는가?
	NOAA AVHRR 검보정	30	NOAA AVHRR 온도 추출 기술이 기존의 방법보다 정밀도가 향상되었는가?
3 차년도 (2009)	GOCI BRDF 검보정	50	시계열 이어도 자료를 이용하여 GOCI BRDF에 대한 검보정이 이루어졌는가?
	GOCI 대기보정 검보정	50	시계열 이어도 자료를 이용하여 GOCI 대기보정 방법의 검보정이 이루어졌는가?
4 차년도 (2010)	GOCI 해수환경 분석기술 검정	60	시계열 이어도 자료를 이용하여 GOCI 해수환경 분석 기술이 검정되었는가?
	국외해색위성 해수환경 분석기술 검정	40	시계열 이어도 자료를 이용하여 국외해색위성 자료의 해수환경 분석 기술이 검정되었는가?
5 차년도 (2011)	GOCI 해수환경 분석기술 보정/개선	60	GOCI 해수환경 분석기술의 문제점을 파악하고 이를 보정하였는가?
	국외해색위성 해수환경 분석기술 보정	40	국외해색위성자료의 해수환경 분석기술의 문제점을 파악하고 이를 보정하였는가?

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

이어도 기지의 스펙트로라이오미터는 매시간 측정됨으로 미국, 유럽, 중국 등의 극궤도 해색위성 자료의 검보정 싸이트로 활용이 가능하다 또한, GOCI가 양질의 검보정 작업에 의해 자료의 질이 우수하다면, 다른 위성들은 GOCI 자료를 이용하여 다른 해색위성 값들의 값이 안정적인지 위성자료간에 비교를 통한 cross-calibration에도 활용 될 수 있을 것이다.

해색위성자료의 검보정 외에도 우리나라의 Kompsat-2와 같은 고해상도 위성자료의 검보정에도 활용이 가능하며 올해 Kompsat-2 위성이 이어도 기지 주변을 몇차례 촬영하였으나, 기상악화와 이어도 스펙트로라이오미터의 고장으로 매칭자료를 얻을 수 없었다.

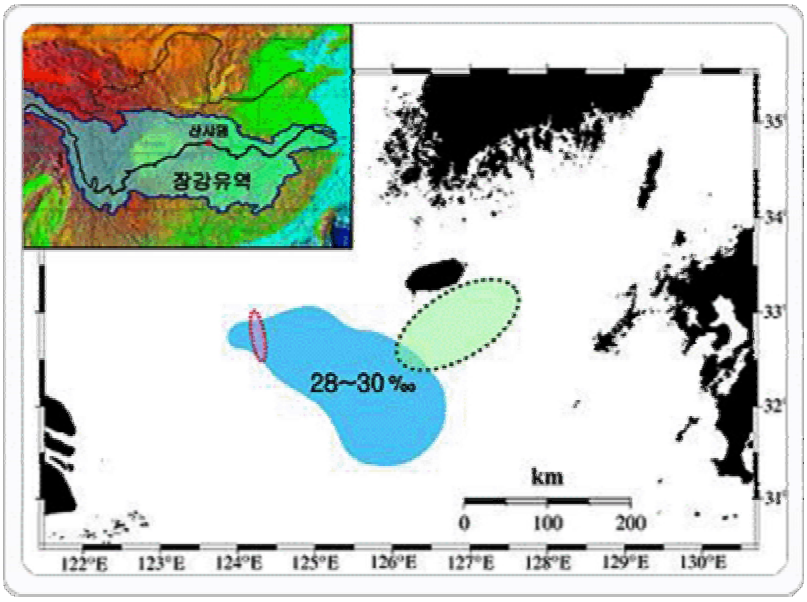

Figure 5.1 Low-salinity area observed around the south-west part of Jeju during 1 to 5 Aug. 2008. And red-tide and green algea detection area. Small image in the upper left part is the basin of the Yangtze River. (KORDI homepage)

또한, 동중국해는 중국의 산업화, 산샤댐의 건설 및 기후변화 등에 의해 많은 이상현상이 발생하고 있다. 올해 발견된 녹조와 적조는 장강 저염분수 덩어리의 동쪽과 서쪽에 각각 분포하고 있어, 앞에는 녹조를 앞세우고 뒤에는 적조를 이끌고 가는 형국이었다. 즉 장강하구에서 밀려나온 저염분수괴가 하구 및 연안역에 분포하는 이들을 실어 나르는 운반체 역할을 한 것이다. 또한, 작년에 제주 서측해역에서 관측된 30 퍼밀리 정도의 약한 저염분수에서 지속

성 유기오염물질의 일종인 DDT가 주변 바닷물보다 훨씬 높은 농도로 검출된 바 있다. 중국은 미국과 구소련에 이어 세계에서 3번째로 많은 양의 DDT를 사용한 국가로, 현재 우리나라와 중국 모두 사용이 금지되었지만 과거에 사용된 난분해성의 DDT가 아직도 장강수에 섞여 이동한 것으로 보인다. 이는 적어도 유해생물이나 유해화학 오염물질들이 장강 하구 및 연안역에만 국한하지 않고 저염분수에 얹혀 우리나라 해역까지 유입되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상의 모니터링에는 위성자료의 분석이 필수적이다. 그러나 해색위성은 구름 등 기상상태의 영향을 받으므로 연속적인 관측이 어렵다. 따라서 이어도 스펙트로라이오미터의 스펙트럼 자료를 이용한다면 녹조나 적조의 영향을 연속적으로 모니터링 할 수 있을 것으로 기대한다.

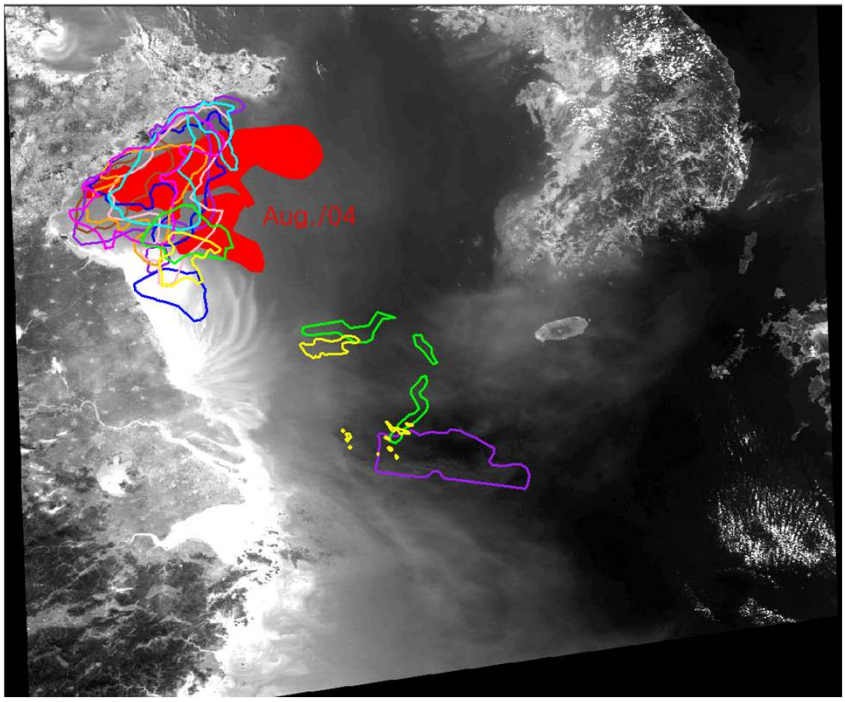

Figure 5.2 Green algae movement monitoring in the East China Sea and the coastal area of the China using MODIS data from April to August, 2008.

제 6 장 참고문헌

문정언, 유주형, 안유환, 양찬수, 최중기. 2006. 이어도 해양과학기지 관측 자료와 SeaWiFS 수출광량의 비교. 대한원격탐사학회 춘계학술대회, 대전 대덕 컨벤션타운, 3월 31일.

민지은, 유주형, 문정언, 안유환, 이규성. 2006. 우리나라 서남부 해역에서의 해수 분광 특성 연구. 한국해양과학기술협의회 춘계공동학술대회, 부산 벡스코, 5월 15-16일.

서영상, 장이현, 이동규, 2001. 위성추적 표류 부이를 이용한 동해 표면수온의 주야간 온도차 에 대한 중규모 시공간변동, 대한원격탐사학회, 17(3): 219-230.

유신재, 2002. OSMI 해양활용 및 검보정에 관한 연구. 한국해양연구원, BSPN 451-00-1449-3, 346p.

유주형, 문정언, 민지은, 안유환, 심재설. 2006. 이어도 해수분광기를 이용한 위성자료의 대기보정 연구. 한국해양과학기술협의회 춘계공동학술대회, 부산 벡스코, 5월 15-16일.

이미애, 서애숙, 1996. AVHRR자료 응용기법 연구. 대한원격탐사학회, 12(1): 60-80.

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.

Ahn, Y.H., and P. Shanmugam, 2004. New methods for correcting the atmospheric effects in Landsat imagery over turbid waters. Korean Journal of Remote Sensing, 20, 289-305.

Alan, P., F. .Fabinenne and H. Glenn, 2006. Nearshore sea temperature variability off Rottnest Island(Western Astralia) derived from satellite data, International Journal of Remote Sensing 27(20): 2503-2518.

Antoine D. and A. Morel, 1999, A multiple scattering algorithm for atmospheric correction of remotely sensed ocean colour (MERIS instrument): principle and implementation for atmospheres carrying various aerosols including absorbing ones, International Journal of Remote Sensing, 20(9), pp 1875-1916.

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.

Barnard, A.H., W.S. Pegau, and R.V. Zaneveld. 1998. Global relationships of the inherent optical properties of the oceans. Journal of Geophysical Research, 103(C11), 24,955-24968.

Bernstein, R.L. 1982. Sea Surface temperature estimation using the NOAA-6 advanced very high resolution radiometer, Journal of Geophysical Research 97: 9455-9465.

Chavez, P.S., 1996. Image-based atmospheric corrections-Revisited and improved. Photogrammetry Engineering and Remote Sensing, 62, 1025-1036.

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., 1978. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans. Applied Optics, 17, 1631-1636.

Gordon, H.R., D.K. Clark, J.L. Muller, and W.A. Hovis, 1980. Phytoplankton pigments from the Nimbus-7 coastal Zone Color Scanner: Comparisons with surface measurements. Science, 210, 63-66.

Gordon, H. R., D. K. Clark, J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans, and W. W. Broenkow, 1983, Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determination and CZCS estimates, Applied Optics, 22 pp 20-36.

Gordon, H.R., 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.

Gordon, H. R., 1997, Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era, Journal of Geophysical Research, 102, pp 17081-17106.

Gould, R.W., and R.A. Arnone, 2002. Coastal optical properties estimated from airborne sensors. Reply to the comments by Hu and Carder. Remote Sensing of Environment, 79, 138-142.

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.

Hu, C., K.L. Carder, and F.E. Muller-Karger, 2000. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid waters: A practical approach. Remote Sensing of Environment, 74, 195-206.

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.

Moran, M.S., R.D. Jackson, P.N. Slater, and P.M. Teillet, 1992. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. Remote Sensing of Environment, 41, 169-184.

Pellegrini, P. F., M. Bucci and M. Innocenti, 2006. Monthly averages of sea surface temperature, International Journal of Remote Sensing 27(12): 2519-2539.

Ryu, J.H., D.L. Choi, and Y.H. Ahn. 2007. Seasonal and annual variations of optical and environmental properties using in situ and remotely sensed data in the East China Sea. In: The 10th anniversary International Symposium on the Yellow Sea Joint Research between Korea and China, Seoul, Korea, July 11.

Shanmugam, P., and Y.H. Ahn, 2007. New atmospheric correction technique to retrieve the ocean colour from SeaWiFS imagery in complex coastal waters. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 9, 511-530.

Shettke, E. P., and R. W. Fenn, 1979, Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humididy variations on their optical properties, AFGL-TR-79-0214, Air Force Geophysics Lab., Hanscomb AFB, Mass.

Song, C., C.E. Woodcock, K.C. Seto, M.P. Lenney, and S.A. Macomber, 2000. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? Remote Sensing of Environment, 75, 230-244.

Wang M., 1991, Atmospheric correction of the second generation ocean color sensors, Ph.D. dissertation (University of Miami, Coral Gables, Fla).

Wang, M., 1999. A sensitivity study of the SeaWiFS atmospheric correction algorithm: Effects of spectral band variations. Remote Sensing of Environment, 67, 348-359.

Wu, J., D. Wang, and M.E. Bauer, 2005. Image-based atmospheric correction of QuickBird imagery of Minnesota cropland. Remote Sensing of Environment, 99, 315-325.

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., S.B. Hooker, J.F. Berthon, and D. D'Alimonte. 2002. Autonomous above-water radiance measurements from an offshore platform: A Field assessment experiment. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19, 808-819.

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.

이어도 해양과학기지 홈페이지. <ieodo.kordi.re.kr>[cited 2007. 7.30]

한국해양연구원 홈페이지 <www.kordi.re.kr> [cited 2008. 10.01]

MODIS 홈페이지 <modis.gfsc.nasa.gov> [cited 2008. 12.01]