

정지궤도 해색탐재체(GOCI) 해수환경분석 알고리즘 개발

문정언*** · 안유환*† · 유주형* · P. Shanmugam***

*한국해양연구원 해양위성센터, **인하대학교 해양학과, ***Department of Ocean Engineering, IIT Madras, India

Development of Ocean Environmental Algorithms for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)

Jeong-Eon Moon***, Yu-Hwan Ahn*†, Joo-Hyung Ryu*, and Palanisamy Shanmugam***

*Korea Ocean Satellite Center, KORDI, **Department of Oceanography, Inha University

***Department of Ocean Engineering, IIT Madras, India

Abstract : Several ocean color algorithms have been developed for GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) using *in-situ* bio-optical data sets. These data sets collected around the Korean Peninsula between 1998 and 2009 include chlorophyll-a concentration (Chl-a), suspended sediment concentration (SS), absorption coefficient of dissolved organic matter (a_{dom}), and remote sensing reflectance (R_{rs}) obtained from 1348 points. The GOCI Chl-a algorithm was developed using a 4-band remote sensing reflectance ratio that account for the influence of suspended sediment and dissolved organic matter. The GOCI Chl-a algorithm reproduced *in-situ* chlorophyll concentration better than the other algorithms. In the SeaWiFS images, this algorithm reduced an average error of 46 % in chlorophyll concentration retrieved by standard chlorophyll algorithms of SeaWiFS. For the GOCI SS algorithm, a single band was used (Ahn *et al.*, 2001) instead of a band ratio that is commonly used in chlorophyll algorithms. The GOCI a_{dom} algorithm was derived from the relationship between remote sensing reflectance band ratio ($R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$) and $a_{dom}(\lambda)$. The GOCI Chl-a fluorescence and GOCI red tide algorithms were developed by Ahn and Shanmugam (2007) and Ahn and Shanmugam (2006), respectively. If the launch of GOCI in June 2010 is successful, then the developed algorithms will be analyzed in the GOCI CAL/VAL processes, and improved by incorporating more data sets of the ocean optical properties data that will be obtained from waters around the Korean Peninsula.

Key Words : GOCI, Ocean Color, Chlorophyll, SS, DOM.

요약 : GOCI(정지궤도 해색센서) 해수환경분석 알고리즘들은 해양 광 특성 현장관측 자료들을 이용하여 개발되었다. 사용된 자료는 1998년부터 2009년까지 한반도 주변 해역에서 총 1348개 정점에서 얻어진 엽록소 농도(Chl-a), 부유물 농도(SS), 용존유기물의 흡광계수(a_{dom}), 원격반사도(R_{rs}) 현장자료들이다. GOCI 엽록소 농도 산출 알고리즘(GOCI Chl-a)은 부유물과 용존유기물의 영향을 모두 고려하고 네 개의 원격반사도 밴드비를 이용하여 개발하였다. GOCI Chl-a 알고리즘은 다른 알고리즘들보다 현장관측자료에 근사한 엽록소 농도 값을 산출하였다. SeaWiFS 영상자료에서 GOCI Chl-a 알고리즘은 SeaWiFS 표준 엽록소

산출 알고리즘들보다 평균 46 % 정도 보정된 엽록소 농도 값을 산출하였다. GOCI 부유물 농도 산출 알고리즘(GOCI SS)은 보편적인 두 개의 원격반사도 밴드비를 사용하지 않고, Ahn *et al.*(2001)의 원격반사도 단일밴드 방법을 사용하여 개발하였다. GOCI 용존유기물 산출 알고리즘(GOCI a_{dom})은 원격반사도 밴드비 $R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$ 와 $a_{dom}(\lambda)$ 의 상관관계를 이용하여 개발하였다. GOCI 엽록소 형광 알고리즘과 GOCI 적조 분석 알고리즘은 Ahn and Shanmugam(2007)와 Ahn and Shanmugam(2006)의 연구들에 의해 각각 개발되었다. 2010년 6월경에 GOCI의 성공적인 발사가 이루어지면 추후 GOCI 자료의 검보정 연구를 통해 개발된 알고리즘들의 문제점을 분석하고, 한반도 주변 해역의 해양 광 특성 현장자료의 지속적인 업데이트를 통한 알고리즘들의 개선작업이 이루어질 것이다.

1. 서론

해양광학적인 측면에서 해수는 “CASE-1 Water”와 “CASE-2 Water” 두 가지로 구분되는데, 이들에 대한 정의와 특성은 Morel and Prieur(1977)에 의해 처음 제창되었으며 Gordon and Morel(1983)에 이르러 정립되었다. CASE-1 Water는 해수의 광 특성이 해수 수피 또는 식물플랑크톤과 그들의 부산물들(유기성 세설물, 동물플랑크톤의 섭식에 의한 부산물, 조류세포들의 자연부패 등)에 의해서 결정되는 해수로, 맑은 해수이며 대양과 같은 해수가 대표적이다. CASE-2 Water는 해수의 광 특성이 부유무기입자, 비색소 생물입자, 용존 유기물 등에 의해서 결정되는 해수로, 탁한 해수이고 높은 생산력을 갖고 있으며 연안해역의 해수가 대표적이다. 한반도 주변 해수들은 해양광학적으로 황해는 CASE-2 Water 해역, 동해는 CASE-1 Water 해역, 동중국해는 CASE-1 Water와 CASE-2 Water 혼합해역, 제주해협은 CASE-1 Water 해역, 한반도 주변 연안은 CASE-2 Water 해역으로 구분된다. 이와 같이 해양광학적으로 한반도 주변 해수들은 각기 다른 해수 광 특성을 가진 해수들이 존재한다. 그러므로 해색위성 자료를 이용하여 한반도 주변 해역에서 해양변동이나 해수환경 모니터링 등의 다양한 형태의 해양학적 연구를 수행하고자 할 경우에는 각각의 해수 광 특성에 적합한 해수환경 분석 알고리즘이 필요하다.

미국과 유럽, 일본 등에서 운용하는 극궤도 위성에 탑재된 해색센서로부터 엽록소 농도를 산출하는 알고리즘들은 대부분 경험적인(Empirical) 방법으로 개발된 알고리즘들이다. CZCS(Coastal Zone Color Scanner), OCTS(Ocean Color Temperature Scanner), SeaWiFS(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 등의 초

기 엽록소 농도 산출 알고리즘들은 엽록소의 흡광과 관련이 높은 490 nm 파장대와 부유물의 산란과 관련이 높은 555 nm 파장대의 2개의 원격반사도 밴드비를 이용하였다(O'Reilly *et al.*, 1998). 그 후 많은 연구를 거쳐서 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer), SeaWiFS 등의 최근 엽록소 농도 산출 알고리즘은 두 개의 원격반사도 밴드비 형태로 초기의 형태와 유사하지만 엽록소 흡광과 관련이 높은 밴드의 사용에 있어서 2개 이상의 밴드를 이용한다(Kahru and Mitchell, 1999; Gohin *et al.*, 2002; Darecki and Stramski, 2004). 그 외 반분석적(Semi-analytical) 방법을 이용하여 개발한 엽록소 농도 산출 알고리즘(Carder *et al.*, 1999, 2004)과 인공신경망을 이용하여 개발한 엽록소 농도 산출 알고리즘(Schiller and Doerffer, 1999; Doerffer and Schiller, 2007) 등이 있다. 또한 지역별로 CASE-2 Water 해역에 적합한 해수환경 분석 알고리즘을 개발하는 경우도 있었다(Doerffer and Fischer, 1994; Tassan, 1994; Corsini and Cipollini, 2002).

현재 사용되고 있는 대부분의 엽록소 농도 산출 알고리즘들은 엽록소 농도 산출에 대한 간섭요인 중 하나인 부유물의 영향을 제거하도록 개발되었다. 그러나 엽록소 농도 산출에 대한 또 다른 간섭요인으로 용존유기물(DOM, dissolved organic matter 혹은 CDOM, Colored Dissolved Organic Matter)의 영향도 중요하다(Tassan, 1988; Carder *et al.*, 1989, 1991). 이것은 엽록소 농도의 최대흡광파장 443 nm 부근에서 부유물의 흡광과 함께 용존유기물의 흡광도 강하게 발생되기 때문이다. Schalles(2006)는 파장 440 nm에서 용존유기물의 흡광계수 값이 증가할수록 원격반사도 밴드비

$R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 값은 지수함수적으로 증가하며, 이러한 밴드비를 이용하여 산출된 엽록소 농도는 용존유기물의 흡광에 의해 과대추정된 값이라고 주장하였다. 따라서 현재 운용중인 대부분의 해색위성용 엽록소 농도 산출 알고리즘들은 용존유기물에 의한 과대추정 현상을 유발시킬 수 있으며, 그 대안으로 엽록소의 형광밴드를 사용한 농도 산출 알고리즘을 제안하였다(Schalles, 2006). CZCS, OCTS, SeaWiFS 등의 해색센서들은 엽록소의 형광신호를 탐지할 수 있는 밴드를 탑재하고 있지 않아서 엽록소의 형광밴드를 사용한 농도 산출 알고리즘의 개발은 이루어지지 않았다. 그러나 최근 운용 중인 MODIS, MERIS 등의 해색센서들과 앞으로 운용될 예정인 다양한 해색센서들은 엽록소의 형광신호를 탐지할 수 있는 밴드를 최소 한 개 이상 갖고 있다. 본 연구의 대상인 GOCI도 형광밴드를 두 개 갖고 있다. 그에 따라 엽록소의 형광밴드를 사용한 농도 산출 알고리즘의 개발과 관련한 연구도 많이 이루어졌고 현재도 활발히 진행되고 있다(Letelier and Abbott, 1996; Huot *et al.*, 2005; Ahn and Shanmugam, 2007; Meroni *et al.*, 2009).

위성영상을 이용한 부유물 농도 분석은 초기에는 두 개의 원격반사도 밴드비를 이용하여 개발된 알고리즘을 사용하였다. 하지만 이러한 밴드비 기반의 부유물 농도 산출 알고리즘들은 해수 중에 부유물질들이 혼용되어 있지 않은 대양 등의 CASE-1 Water 해역에서는 잘 맞지만, 다양한 부유물질들이 많이 혼용되어 있는 연안해역 등의 CASE-2 Water 해역에서는 잘 맞지 않는다(Tassan, 1994; Pradham *et al.*, 2005). 따라서 한반도 서해 및 남해 연안과 같이 부유물의 농도가 높은 해역에 대해서는 이러한 두 개의 원격반사도 밴드비를 활용한 초기의 부유물 농도 산출 알고리즘을 위성자료 분석에 적용하는 것이 수월하지 않았다. Ahn *et al.*(2001)는 원격반사도 밴드비보다 단일밴드를 이용하여 부유물 농도 산출 알고리즘을 개발하는 것이 효율적이며, 파장 555 nm의 원격반사도와 부유물 농도의 상관관계를 이용하여 부유물 농도 산출 알고리즘을 개발하였다. Ahn *et al.*(2004)는 Ahn *et al.*(2001)의 단일밴드 방식의 부유물 농도 산출 알고리즘을 이용하여 동중국해 부유물 분포의 발달과정을 4단계로 구분하였다. 최근에는 Zhang *et al.*(2010)의 연구에 의해, 중국 대륙에 인접

한 황해와 동중국해에서 현장관측을 통해 측정된 부유물질의 역산란계수, 흡광계수, 원격반사도 자료 등을 이용하여 MODIS 위성에 적용 가능한 부유물 농도 산출 알고리즘이 개발되었다.

해색위성의 자료처리 과정 중에서 현재 운용 중인 용존유기물의 흡광계수 분석 알고리즘들은 반분석적 방법을 이용한 Carder 모델(Carder *et al.*, 1999)과 GSM 모델(Garver and Siegel, 1997; Maritorea *et al.*, 2002), 분석적 방법을 이용한 QAA 모델(Lee *et al.*, 2002, 2005) 등의 알고리즘들을 이용한다. 그러나 이들 모델에서 산출된 값은 부유물의 흡광계수와 용존유기물의 흡광계수의 합일 뿐, 순수하게 용존유기물의 흡광계수 값만을 표현한 산출물이 아니다. 용존유기물의 흡광스펙트럼 형태의 일반적인 특징은 단파장대로 갈수록 흡광의 세기가 급격히 증가하는 지수함수의 형태이고, Bricaud *et al.*(1981)는 이러한 형태를 지수함수의 수식으로 표현하였다.

적조연구에 있어 인공위성자료의 활용은 대부분 현장관측을 통해 발생한 적조의 이동 및 확산 경로 등을 나중에 위성자료를 활용하여 역추적하거나 혹은 적조 발생메커니즘 연구에 보조적인 자료로만 활용되었다(Tang *et al.*, 2004; Ahn *et al.*, 2005; Ahn *et al.*, 2006). 원격탐사를 이용하여 적조생물을 탐지하는 알고리즘 개발은 Carder and Steward(1985)에 의해 처음 시도되었다. Carder and Steward(1985)는 플로리다 연안에 발생한 와편모류의 번성(*dinoflagellate* bloom)을 헬리콥터에 장착된 분광복사기(spectroradiometer)로 원격반사도를 측정 한 후, 모델을 통해 적조생물의 농도를 산출하였다. 그러나 이 연구는 다양한 적조생물들에 대한 연구가 아니라 오직 *Ptychodiscus brevis* 종에 대한 모델링 연구결과로 사용에 제한적이다. 안유환 외(2009)는 인공위성에서 적조를 탐지하기 위한 선행 연구로 한반도 주변 해역에서 발생하는 적조생물들에 대한 고유광 특성을 연구하였다. 이것을 기반으로 적조를 탐지 및 추적할 수 있는 적조지수 알고리즘을 개발하였다(Ahn and Shanmugam, 2006; Shanmugam *et al.*, 2008). Hu *et al.*(2005)는 MODIS의 엽록소 형광밴드를 이용하여 와편모류 적조생물 중 *Karenia brevis* 종에 대한 탐지 및 추적할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

따라서 본 연구에서는 해양 광 특성 현장자료들을 이

용하고 GOCI의 특성을 고려하여 한반도 주변 해역에 최적화된 해수환경 분석 알고리즘들을 개발하고자 한다. 그 중에서 GOCI 엽록소 형광 알고리즘과 GOCI 적조분석 알고리즘은 Ahn and Shanmugam(2007)과 Ahn and Shanmugam(2006)의 연구논문들을 각각 요약하여 소개하고자 한다.

2. 자료 및 방법

GOCI 해수환경 분석 알고리즘을 개발하기 위하여, 1998년부터 2009년까지 한반도 주변 해역에서 해양환경과 해수 광 특성에 대한 현장관측 자료들을 이용하였다. 현장관측해역은 Fig. 1과 같고 총 관측정점은 1348개 정점이다(Table 1). 해수 광 특성과 해양환경 변수들에 대한 측정방법은 안유환 외(1999)와 동일하다. 본 연구에 사용된 현장관측자료들은 엽록소 농도(Chl-a, chlorophyll-a concentration), 부유물 농도(SS, Suspended Sediment Concentration), 용존유기물의 흡광계수(a_{dom} , Absorption Coefficient of DOM)와 함께, 해수 외형적 광 특성(AOP, Apparent Optical Property)들 중의 하나인 원격반사도(R_{rs} , Remote Sensing Reflectance) 값들이다. 현재 운용중인 엽록소 농도 산출 알고리즘들과 본 연구에서 개발된 알고리즘을 위성자료에 적용하여 상호 비교·분석하기 위하여 한국해양연구원에서 매일 수신하는 SeaWiFS 해색위성

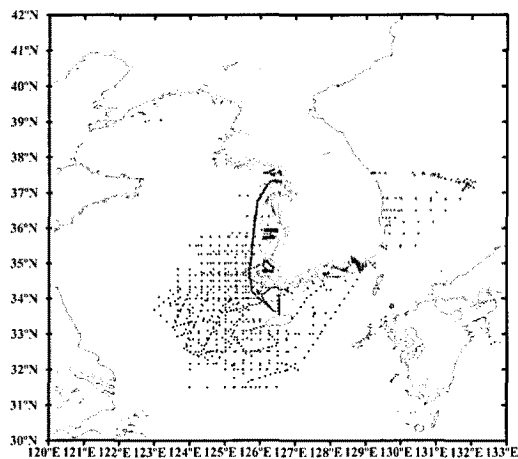


Fig. 1. The observation map.

자료를 이용하였다. SeaWiFS 자료의 처리에 사용된 프로그램은 SeaDAS(SeaWiFS Data Analysis System) version 5.4이다.

3. 결과

1) GOCI 엽록소 농도 산출 알고리즘

Fig. 2는 한반도 주변 해역의 현장관측자료들을 이용하여 두 개의 원격반사도 밴드비 조합들 중에서 $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 와 $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 각각에 대한 엽록소 농도와 상관관계를 분석한 그림들이다. $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 와 $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 은 주로 SeaWiFS, MODIS 등의 해색위성에서 엽록소 농도 산출 알고리즘에 사용되는 원격반사도 밴드비들이다. 그림에서, $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 와 엽록소 농도의 상관계수는 0.23이고(Fig. 2a) $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 와 엽록소 농도의 상관계수는 0.34로(Fig. 2b) 모두 상관도가 낮았다. 따라서 GOCI 엽록소 농도 산출 알고리즘으로 적합하지 않다.

Fig. 3은 한반도 주변 해역의 현장관측자료를 이용하여 412 nm, 443 nm, 490 nm, 555 nm 네 개의 원격반사도 밴드비 조합과 엽록소 농도의 상관관계를 분석한 그림이다. 도출된 복합적인 밴드비 조합의 구성개념은 GOCI밴드 구성에서 엽록소 농도와 관련이 높은 모든 밴드들 중에서 형광영역을 제외한 흡광영역의 밴드들인 443 nm와 490 nm를 모두 합산하여 엽록소에 의한 영향을 극대화하고, 여기서 먼저 용존유기물의 흡광과 관련이 높은 412 nm를 이용하여 엽록소 흡광영역 밴드들의 합에 포함된 용존유기물의 영향을 제거한다. 두 번째로 부유물과 관련이 높은 555 nm를 이용하여 부유물의 영향을 제거하면 엽록소 농도 산출에서 용존유기물과 부유물의 영향을 상당히 낮출 수 있다. Fig. 3에서 네 개의 원격반사도 밴드비와 엽록소 농도의 상관계수는 0.79로 Fig. 2에서 보여준 두 개의 원격반사도 밴드비보다 매우 좋은 상관관계를 보였다. 따라서 한반도 주변 해역에 최적화된 GOCI 엽록소 농도 산출 알고리즘(GOCI Chl-a)은 다음과 같다.

$$\text{Chl-a (mg/m}^3\text{)} = 1.8528R^{3.263} \quad (1)$$

Table 1. The observation schedule during 1998-2009

no.	Sampling Platform	Time Period	Sampling Location	Number of Stations Visited
1	올림픽호	1998.8.26-8.28	진해만 및 거제도 주변해역	18
2	이어도호	1998.9.23-9.26	거제도 주변해역 및 제주해협	33
3	어선임차	1998.10.20-10.23	황해남부연안해역	58
4	르벨르호	1999.6.25-7.14	동해	36
5	올림픽호	1999.8.09-8.10	진해만 및 거제도 연안해역	32
6	어선임차	1999.9.02-9.03	완도 주변해역	5
7	이어도호	2000.5.19-5.29	동해	30
8	아라호	2000.7.21-7.23	제주해협	23
9	이어도호	2001.1.31-2.05	황해남부해역	49
10	탐구8호	2001.6.04-6.15	황해	20
11	올림픽호	2001.8.28-8.29,31	진해만 및 남해연안	32
12	이어도호	2001.12.15-20	황해남부해역	42
13	탐구20호	2002.2.19-2.25	동중국해	20
14	이어도호	2002.5.02-5.03	황해남부해역	25
15	탐구3호	2002.6.18-6.22	남해및 제주남서해역	21
16	올림픽호	2002.9.02-9.07	거제도 및 가덕도 주변해역	29
17	이어도호	2003.2.09-2.20	황해 남부해역	76
18	이어도호	2003.4.27-5.04	제주서부해역 및 동중국해	74
19	올림픽호	2003.8.05-8.06	진해만 및 거제도 연안해역	26
20	이어도호	2003.10.07-10	동중국해	32
21	이어도호	2004.3.23-3.25	동중국해	27
22	이어도호	2004.5.09-5.12	황해	47
23	올림픽호	2004.8.10-8.11	진해만 및 거제도 연안해역	15
24	이어도호	2004.9.22-9.24	황해	49
25	이어도호	2005.3.15-3.17	동중국해	26
26	어선임차	2005.3.26-3.27	새만금 인근 해역	30
27	어선임차	2005.5.29	새만금 인근 해역	12
28	이어도호	2005.6.08-6.10	황해	31
29	어어도호	2005.8.22-8.29	동중국해	42
30	어선임차	2005.10.20	새만금 인근 해역	9
31	장목호	2005.11.30-12.01	거제도 및 가덕도 주변해역	14
32	이어도호	2006.6.08-6.09	황해 남부해역	13
33	이어도호	2006.8.12-8.16	동중국해	28
34	어선임차	2006.9.19-9.22	군산 및 새만금 인근 해역	39
35	이어도호	2006.11.29-12.05	독도 주변 해역	8
36	이어도호	2007.3.07-3.10	울릉도-독도 해역	6
37	이어도호	2007.5.07-5.12	동중국해	62
38	장목호	2007.8.14-8.16	거제도 연안 해역	7
39	어선임차	2007.10.09-10.10	경기만 시화 방조제 주변 해역	10
40	이어도호	2008.3.12-3.16	울릉도-독도 해역	9
41	어선임차	2008.5.07-5.09	강화도 주변 해역	22
42	장목호	2008.8.06-8.14	남해 연안 해역	43
43	이어도호	2008.11.12-11.16	황해	55
44	이어도호	2009.3.29	독도 주변 해역	1
45	이어도호	2009.7.30-8.04	동중국해	18
46	이어도호	2009.8.13-8.19	울릉도-독도 해역	11
47	이어도호	2009.10.06-10.13	동해	21
48	이어도호	2009.10.27-11.04	독도 주변 해역	12

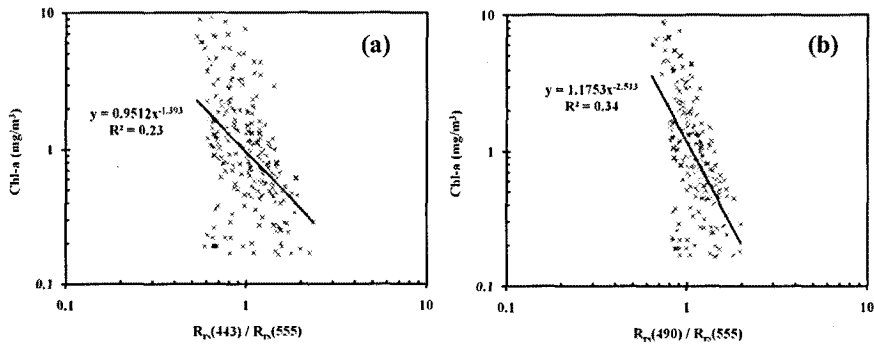


Fig. 2. The relationships between *in-situ* chlorophyll-a concentration (Chl-a) and 2-bands remote sensing reflectance (R_{rs}) ratios. (a) Chl-a and $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$, (b) Chl-a and $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$.

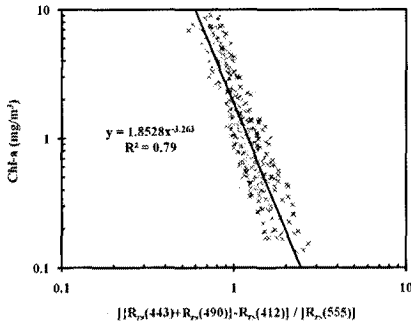


Fig. 3. The relationship between *in-situ* chlorophyll-a concentration (Chl-a) and 4-bands remote sensing reflectance ratio.

$$\text{where, } R = \frac{\{R_{rs}(443) + R_{rs}(490)\} - R_{rs}(412)}{R_{rs}(555)}$$

여기서, $R_{rs}(412)$, $R_{rs}(443)$, $R_{rs}(490)$, $R_{rs}(555)$ 는 각각 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 555 nm에서의 원격반사도 값이다.

Table 2와 Fig. 4는 SeaDAS에서 사용중인 SeaWiFS 표준 염록소 농도 산출 알고리즘들(OC4v4, OC2v2)과 한-중-일 3개국 해색원격탐사 연구자들이 공동으로 개발한 YOC Chl-a 알고리즘(Siswanto *et al.*, 2010), 그리고 GOCI Chl-a 알고리즘에 대한 현장관측자료와의 상관성을 비교·분석한 자료들이다. 그림 및 표에서 보면, GOCI Chl-a와 YOC Chl-a 알고리즘들의 RMSE 값은 각각 0.19와 0.23이고, OC4v4와 OC2v2 알고리즘들의 RMSE 값은 각각 0.30과 0.28이다. GOCI Chl-a 알고리즘을 사용한 경우에 RMSE 값이 다른 알고리즘들보다 가장 낮았다.

Table 2. The comparisons for chlorophyll-a algorithms

Name	Equation	Reference	RMSE
OC2v2	$10^{(0.2974-2.2429R+0.8358R^2-0.0077R^3)} - 0.0929$ $R = \log_{10}\left(\frac{R_{rs}490}{R_{rs}555}\right)$	O'Reilly <i>et al.</i> (1998)	0.28
OC4v4 (SeaWiFS standard)	$10^{(0.366-3.067R+1.930R^2+0.649R^3-1.532R^4)}$ $R = \log_{10}\left(\frac{\text{Max}(R_{rs}443, R_{rs}490, R_{rs}510)}{R_{rs}555}\right)$	O'Reilly <i>et al.</i> (1998)	0.30
YOC Chl-a	$10^{(0.25484-3.12684R+0.14715R^2)}$ $R = \log_{10}\left[\left(\frac{R_{rs}443}{R_{rs}555}\right)\left(\frac{R_{rs}412}{R_{rs}490}\right)^{0.8}\right]$	Siswanto <i>et al.</i> (2010)	0.23
GOCI Chl-a	$1.8528R^{-3.263}$ $R = \frac{(R_{rs}443 + R_{rs}490) - R_{rs}412}{R_{rs}555}$	In this Study	0.19

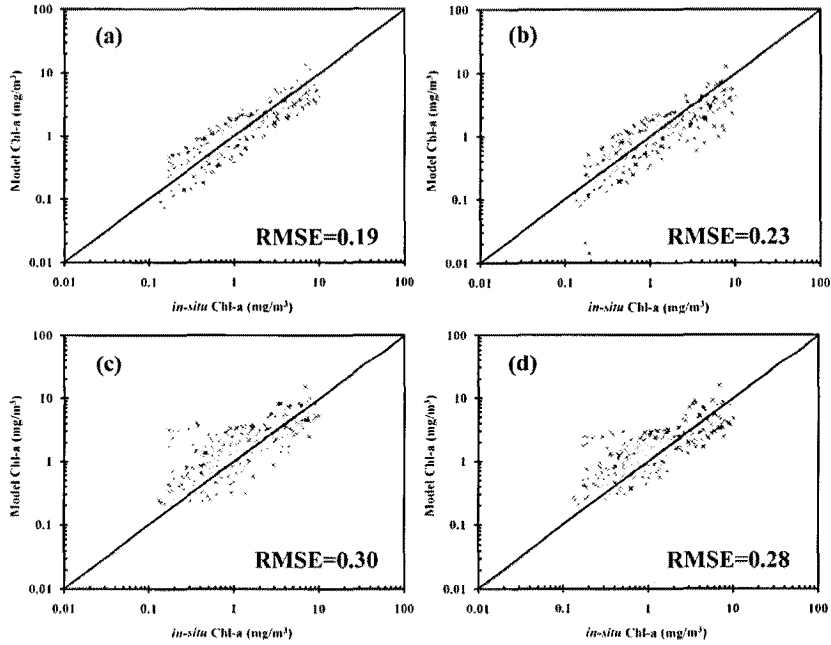


Fig. 4. The relationships between *in-situ* chlorophyll-a concentration (Chl-a) and Chl-a obtained from algorithms. (a) GOCI Chl-a algorithm, (b) YOC Chl-a algorithm, (c) OC4v4 algorithm, (d) OC2v2 algorithm.

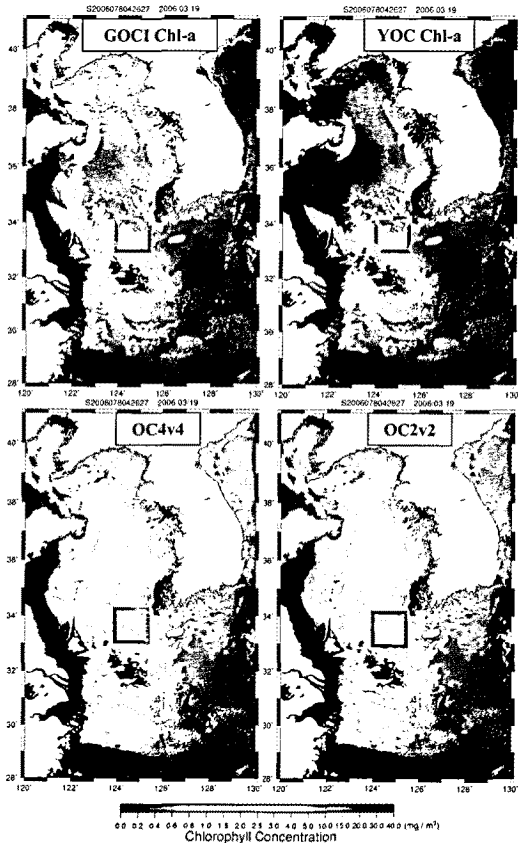


Fig. 5. The comparison for chlorophyll distribution images obtained from GOCI Chl-a, YOC Chl-a, OC4v4 and OC2v2 algorithms using SeaWiFS data in March 19, 2006.

Fig. 5는 OC2v2, OC4v4, YOC Chl-a, GOCI Chl-a 알고리즘들을 이용하여 산출된 한반도 주변 해역에서의 SeaWiFS 엽록소 농도 분포 이미지들이다. 대부분의 해역에서 GOCI Chl-a와 YOC Chl-a 알고리즘들을 사용했을 경우가 OC4v4와 OC2v2 알고리즘들을 사용했을 때보다 감소된 엽록소 농도 분포 패턴을 보여준다. 특히 YOC Chl-a 알고리즘은 연안에 가까운 해역이나 탁도가 높은 해역에서 GOCI Chl-a 알고리즘보다 더욱 감소된 엽록소 농도 분포 패턴을 보여주었다. Table 3은 Fig. 5에서 붉은 색 사각형으로 표시된 부분의 값들을 평균하여 알고리즘별 비교·분석한 결과이다. GOCI Chl-a 알고리즘은 OC2v2보다 40%, OC4v4보다 53

Table 3. The comparisons for chlorophyll-a concentration obtained from red box area of Fig. 5

	GOCI Chl-a	YOC Chl-a	OC4v4	OC2v2
Average	1.18 mg/m ³	1.29 mg/m ³	2.48 mg/m ³	1.96 mg/m ³
vs. OC4v4	53 % decrease	48 % decrease		
vs. OC2v2	40 % decrease	35 % decrease		

Selection Area: Lat. 33° - 34°, Long. 124° - 125° (Red Box of Fig. 5)

% 감소하였다. YOC Chl-a 알고리즘은 OC2v2보다 35%, OC4v4보다 48% 감소하였다. GOCI Chl-a와 YOC Chl-a 알고리즘들은 용존유기물의 영향에 의한 엽록소 농도의 과대추정현상을 줄이기 위해 412 nm 밴드를 추가로 활용하여 농도를 산출하고 있지만 OC4v4와 OC2v2 알고리즘들은 그렇지 못하다(Table 2의 수식 참조). 이러한 현상은 유사한 알고리즘 수식을 사용하는 MODIS, MERIS 등의 해상위성자료를 이용할 때도 발생할 수 있다.

2) GOCI 부유물 농도 산출 알고리즘

Fig. 6은 한반도 주변 해역의 현장관측자료들을 이용하여 부유물 농도와 원격반사도 밴드비들의 상관관계를 분석한 그림들이다. 일반적으로 부유물의 흡광 스펙트럼은 파장 555 nm 이하의 단파장 영역에서 높은 흡광 값을 나타내지만, 엽록소 농도와 용존유기물의 흡광 값도 부유물 못지 않게 높다. 이러한 여건을 잘 고려하여 원격반사도 밴드비를 이용한 GOCI 부유물 농도 산출 알고리즘(GOCI SS)을 개발하고자 하였다. 그러나 Fig. 6

에서 두 개의 원격반사도 밴드비들인 $R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$, $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$, $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 와 부유물 농도와 의 상관계수는 각각 0.41, 0.38, 0.38로 낮은 상관도를 나타냈다.

Fig. 7은 한반도 주변 해역의 현장관측자료들을 이용하여 부유물 농도와 $R_{rs}(555)$ 의 상관관계를 분석한 그림이다. CASE-2 Water 해역에서 원격반사도 스펙트럼

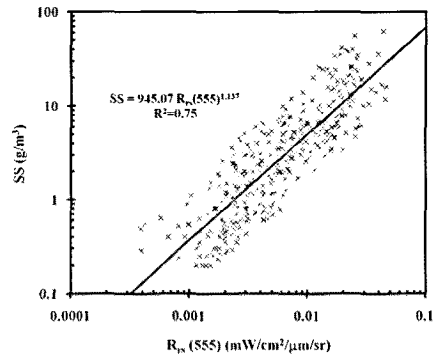


Fig. 7. The relationship between *in-situ* suspended sediment concentration (SS) and remote sensing reflectance at 555 nm ($R_{rs}(555)$).

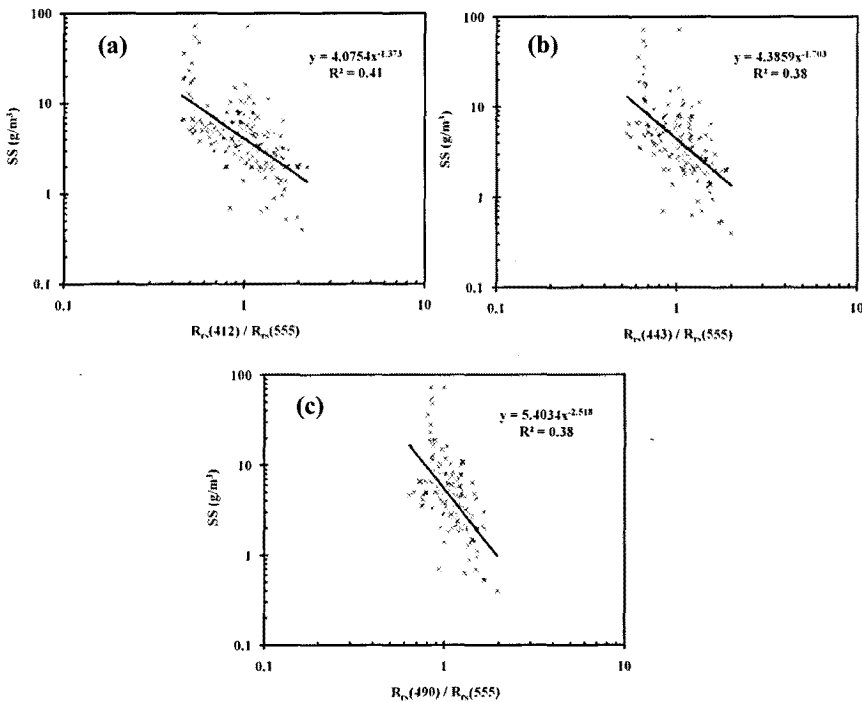


Fig. 6. The relationships between *in-situ* suspended sediment concentration (SS) and 2-bands remote sensing reflectance (R_{rs}) ratios. (a) SS and $R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$, (b) SS and $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$, (c) SS and $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$.

의 형태는 일반적으로 파장 555 nm에서 최대의 반사도 값을 나타내고, 파장 555 nm를 기준으로 단파장과 장파장 영역으로 파장이 증감할수록 반사도 값이 낮아지는 산(山) 형태와 매우 유사하다. 이것은 부유물의 산란 효과에 의해 $R_{rs}(555)$ 에서 높은 반사도 값을 나타내기 때문이다. Fig. 7에서 보면, 부유물 농도와 $R_{rs}(555)$ 의 상관계수는 0.75로 Fig. 6의 원격반사도 밴드비의 상관계수들보다 약 1.9배 정도 향상되었다. 따라서 GOCI SS 알고리즘은 다음과 같다.

$$SS(g/m^3) = 945.07(R_{rs}(555))^{1.137} \quad (2)$$

Table 4과 Fig. 8은 SeaDAS에서 사용하는 부유물 농도 산출 알고리즘(Clark TSM)과 YOC 부유물 농도 산출 알고리즘(YOC TSM, Siswanto *et al.*, 2010), 그리고 GOCI SS 알고리즘에 대한 현장관측자료와의 상관성을 비교·분석한 자료들이다. 그림에서 GOCI SS 알고리즘의 RMSE 값은 0.28이고, Clark TSM과 YOC TSM 알고리즘들의 RMSE 값들은 각각 0.61과 0.33이다. GOCI SS 알고리즘을 사용한 경우에 RMSE 값이 다른 알고리즘들보다 가장 낮았다. 표에서 GOCI SS와 YOC TSM 알고리즘들은 한반도 주변 해역의 해양 광특성 자료를 기반으로 개발되었지만, GOCI SS는 단일

Table 4. The comparisons for suspended sediment algorithms

Name	Equation	Reference	RMSE
Clark TSM (include SeaDAS)	$SS = 10^{0.51897-2.24106R+1.20113R^2-4.35315R^3+9.07162R^4-5.10552R^5}$ $R = \log_{10}\left(\frac{nL_w(412) + nL_w(443)}{nL_w(510)}\right)$	MODIS ATBD (1997)	0.61
YOC TSM	$SS = 10^{0.73789+22.7885R1-0.57437R2}$ $R1 = R_{rs}(555) + R_{rs}(670)$ $R2 = \frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)}$	Siswanto <i>et al.</i> (2010)	0.33
GOCI SS	$SS = 945.07R^{1.137}$ $R = R_{rs}(555)$	In this Study	0.28

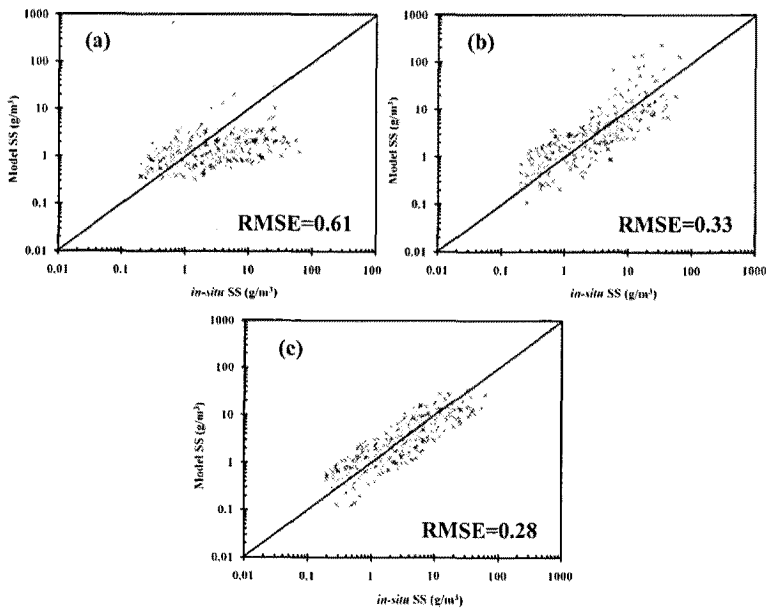


Fig. 8. The relationships between *in-situ* suspended sediment concentration (SS) and SS obtained from algorithms. (a) Clark TSM algorithm, (b) YOC TSM algorithm, (c) GOCI SS algorithm.

밴드 방식의, YOC TSM은 원격반사도 밴드비 방식의 알고리즘이라는 차이점이 있다. 또한 Clark TSM 과 YOC TSM 알고리즘들은 엽록소 농도 산출시 주로 사용되는 일반적인 원격반사도 밴드비 형태와 유사한 수식을 사용하고 있는 공통점이 있다.

3) GOCI 용존유기물 산출 알고리즘

Fig. 9는 한반도 주변 해역의 현장관측자료를 이용하여 용존유기물의 흡광계수 값들과 원격반사도 밴드비들의 상관관계를 분석한 그림들이다. $a_{dom}(400)$ 과 $R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$ 의 상관계수는 0.72, $a_{dom}(400)$ 과 $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 의 상관계수는 0.72, $a_{dom}(400)$ 과 $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 의 상관계수는 0.64로, $a_{dom}(400)$ 과

$R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$ 의 상관도와 $a_{dom}(400)$ 과 $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 의 상관도가 가장 높았다(Fig. 9 a-c). $a_{dom}(412)$ 과 $R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$ 의 상관계수는 0.73, $a_{dom}(412)$ 과 $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 의 상관계수는 0.72, $a_{dom}(412)$ 과 $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 의 상관계수는 0.64로, $a_{dom}(412)$ 과 $R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$ 의 상관도가 가장 높았다(Fig. 9 d-f). GOCI 용존유기물 산출 알고리즘은 412 nm와 555 nm의 원격반사도 밴드비를 기반으로 개발하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$a_{dom}(400)[m^{-1}] = 0.2355R^{1.342} \quad (3)$$

$$a_{dom}(412)[m^{-1}] = 0.2047R^{1.335} \quad (4)$$

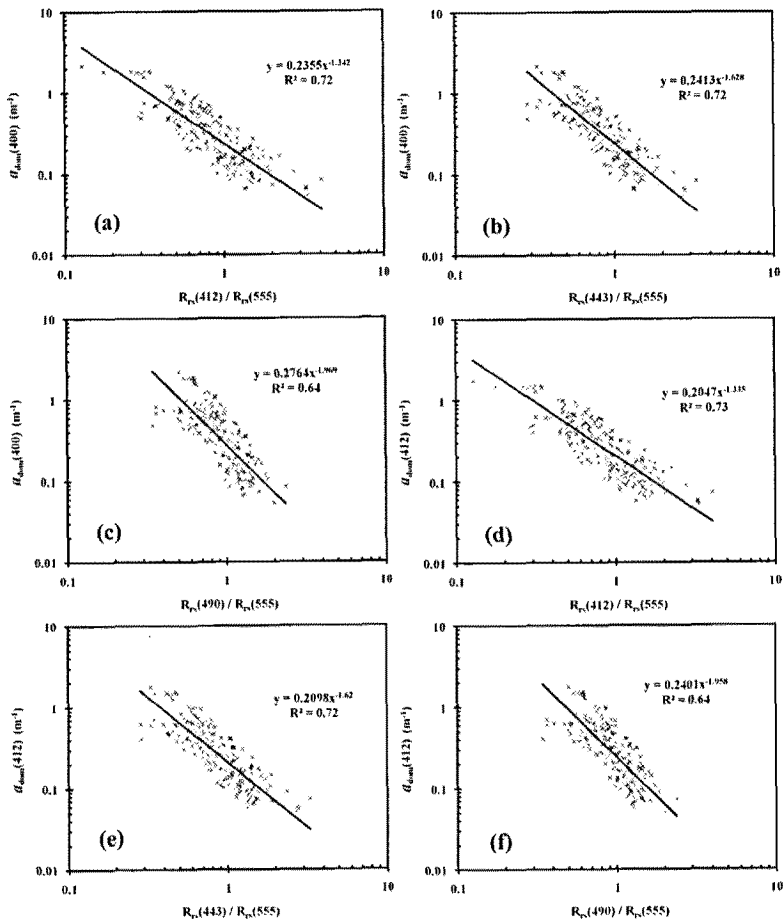


Fig. 9. The relationships between *in-situ* absorption coefficients of dissolved organic matter (a_{dom}) with wavelengths and 2-bands remote sensing reflectance (R_{rs}) ratios. (a) $a_{dom}(400)$ and $R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$, (b) $a_{dom}(400)$ and $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$, (c) $a_{dom}(400)$ and $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$, (d) $a_{dom}(412)$ and $R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$, (e) $a_{dom}(412)$ and $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$, (f) $a_{dom}(412)$ and $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$.

$$\text{where, } R = \frac{R_{rs}(412)}{R_{rs}(555)}$$

그리고 Bricaud *et al.*(1981)의 연구에서 용존유기물 흡광계수 스펙트럼을 지수함수의 수식으로 표현한 식에 의하면, 용존유기물의 흡광계수 스펙트럼의 기울기(S)는 다음과 같다.

$$S = \left(\frac{1}{\lambda - \lambda_0} \right) \times \ln \left(\frac{a_{dom}(\lambda)}{a_{dom}(\lambda_0)} \right) \quad (5)$$

식(3)과 식(4)에 의해서 식(5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \left(\frac{1}{12} \right) \times \ln \left(\frac{a_{dom}(412)}{a_{dom}(400)} \right) \quad (6)$$

그러므로 식(3)에서 식(6)을 이용하면 파장에 따른 $a_{dom}(\lambda)$ 값을 산출할 수 있다.

Table 5와 Fig. 10은 GOCI 용존유기물 산출 알고리즘들(GOCI $a_{dom}(400)$ 과 GOCI $a_{dom}(412)$)과 YOC 용

Table 5. The comparisons for absorption coefficient of dissolved organic matter algorithms

Name	Equation	Reference	RMSE
GOCI $a_{dom}(400)$	$a_{dom}(400) = 0.2355R^{-1.3423}$ $R = \frac{R_{rs}(412)}{R_{rs}(555)}$	In this Study	0.18
GOCI $a_{dom}(412)$	$a_{dom}(412) = 0.2047R^{-1.3351}$ $R = \frac{R_{rs}(412)}{R_{rs}(555)}$	In this Study	0.18
YOC $a_{dom}(440)$	$a_{dom}(440) = 10^{-1.11529 - 1.38942R + 0.51803R^2}$ $R = \log_{10} \left[\left(\frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)} \right) (R_{rs}(443))^{0.1} \right]$	Siswanto <i>et al.</i> (2010)	0.24

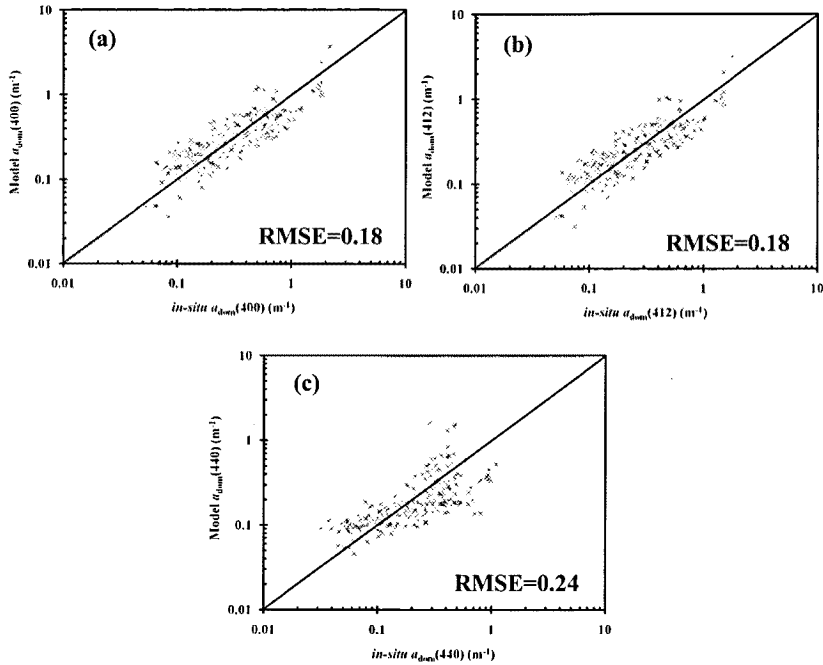


Fig. 10. The relationships between *in-situ* absorption coefficients of dissolved organic matter (a_{dom}) and a_{dom} obtained from algorithms. (a) developed GOCI $a_{dom}(400)$ algorithm in this study, (b) developed GOCI $a_{dom}(412)$ algorithm in this study, (c) YOC $a_{dom}(440)$ algorithm.

존유기물 산출 알고리즘(YOC a_{dom} (440), Siswanto *et al.*, 2010)에 대한 현장관측자료와의 상관성을 비교·분석한 자료들이다. 그림에서 GOCI 용존유기물 산출 알고리즘들의 RMSE값은 모두 0.18로, YOC 용존유기물 산출 알고리즘의 RMSE 값인 0.24보다 낮았다. 표에서 GOCI 용존유기물 산출 알고리즘들은 파장 412 nm의 원격반사도 값을 사용하고 있지만 YOC 용존유기물 알고리즘은 그렇지 않고 엽록소 농도 산출에 주로 사용되는 보편적인 원격반사도 밴드비 형태와 유사한 수식을 사용하는 차이점이 있다.

4) GOCI 엽록소 형광 알고리즘

본 연구에서는 GOCI 해양자료처리시스템(GDPS)에서 사용되고 있는 엽록소 형광 알고리즘을 소개하고자 한다(Ahn and Shanmugam, 2007). 원격반사도 스펙트럼의 형광 부분은 660 nm에서 시작하여 688 nm에서 최고값을 나타내고 730 nm에서 끝나는 삼각형 모양

의 형태로 원격반사도 스펙트럼 형태의 일부분을 이루고 있다(Fig. 11). 660 nm와 730 nm을 일직선으로 연결하여(Fig. 11의 Flu base) 형성된 면적($\Delta Flu_{(area)}$)과 그에 따른 높이는 엽록소 양에 따라 그 값이 변화하므로, 엽록소 농도를 추정하는데 사용될 수 있다. Fig. 11에서 Flu base에서 최고값까지의 높이(Fluorescence Line Height, FLH, Fig. 11의 ΔFlu)는 다음과 같다.

$$\Delta Flu = XY = CX - YC \tag{7}$$

식(7)은 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$\Delta Flu = XY = CX - \left[\frac{R_L - R_S}{\lambda_{(L)} - \lambda_{(S)}} (\lambda_{(F)} - \lambda_{(S)}) + R_S \right] \tag{8}$$

여기서, CX는 실제 측정된 형광신호의 최고값이고, YC는 형광신호의 최고값이 x축과 만나는 지점에서 Flu base 선까지의 높이이다. R_S 는 원격반사도 스펙트럼 형광부분의 시작지점 파장대(660 nm)에서의 원격반사도 값이고 R_L 는 원격반사도 스펙트럼 형광부분의 끝지점 파장대(730 nm)에서의 원격반사도 값이다. λ_S 는 원격반사도 스펙트럼 형광부분의 시작지점 파장이고, λ_L 는 원격반사도 스펙트럼 형광부분의 끝지점 파장이며, λ_F 는 원격반사도 스펙트럼 형광부분의 최고값에 대한 파장이다. $\Delta Flu_{(area)}$ 은 엽록소 형광으로부터 방출된 에너지의 총량을 의미하며, 다음과 같다.

$$\Delta Flu_{(Area)} = \int_{660}^{730} \Delta Flu(\lambda) d\lambda \tag{9}$$

따라서 GOCI 엽록소 형광 알고리즘은 681 nm에서의 FLH ($\Delta Flu(681)$)와 형광신호에 의해 만들어지는 면적에 기반하여 개발되었다. Fig. 12와 Table 6은 한반

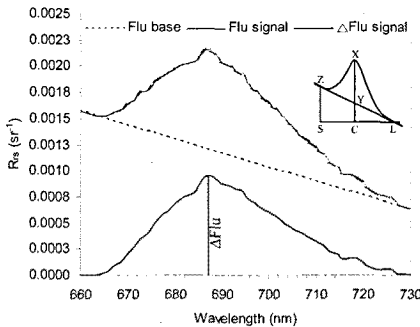


Fig. 11. Schematic representation of the fluorescence line height (ΔFlu) estimation using the remote sensing reflectance spectrum (from Ahn and Shanmugam, 2007).

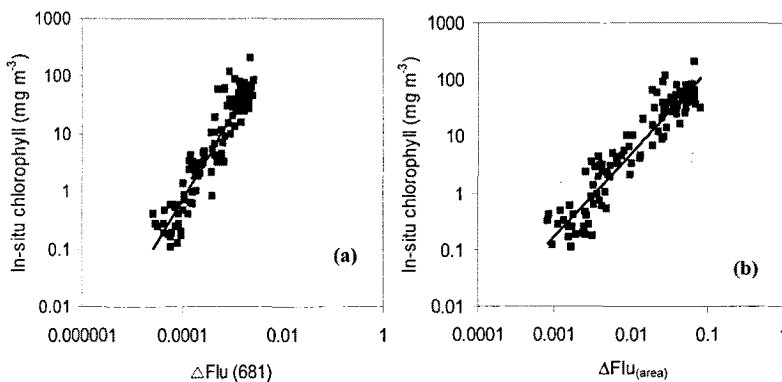


Fig. 12. Relationships between *in-situ* chlorophyll concentrations and (a) $\Delta Flu(681)$ and (b) $\Delta Flu_{(area)}$. The solid line is the best-fit regression to our bio-optical dataset (N=118) (from Ahn and Shanmugam, 2007).

Table 6. The regression equations and squared correlation coefficients obtained for the fluorescence algorithms (from Ahn and Shanmugam, 2007)

Algorithms	Correlation coefficient (r ²)
Chl-a = 605908[ΔFlu(681)] ^{1.48}	0.88
Chl-a = 4142.3[ΔFlu(area)] ^{1.46}	0.90

도 주변 해역에서 현장관측된 엽록소 농도와 원격반사도의 형광부분에서 산출된 ΔFlu(681)와 ΔFlu(area)의 상관관계를 분석한 그림들이다. ΔFlu(681)와 엽록소 농도의 상관계수는 0.88이고 ΔFlu(area)와 엽록소 농도의 상관계수는 0.90이다. Fig. 13은 GOCI 엽록소 형광 알고리즘들로부터 산출된 엽록소 농도와 현장관측된 엽록소 농도를 비교·분석하여 형광 알고리즘들의 유효성을 검증한 자료들이다. ΔFlu(681)을 이용한 형광 알고리즘의 상관계수는 0.94이고 ΔFlu(area)을 이용한 형광 알고리즘의 상관계수는 0.95이다.

5) GOCI 적조분석 알고리즘

본 연구에서는 GOCI 해양자료처리시스템에서 사용되고 있는 적조분석 알고리즘을 소개하고자 한다(Ahn and Shanmugam, 2006). 적조지수(Redtide Index, RI)는 엽록소 뿐만 아니라 부유물이나 용존유기물 같은 다른 해수 성분에도 민감한 기본적인 원격반사도 밴드비의 알고리즘과 다르다. 적조지수는 한반도 주변 해역의 해수를 적조가 발생한 해수와 그렇지 않은 해수, 그리고 탁한 해수로 구분할 수 있는 지표로 정의할 수 있다. 적조지수는 적조 생물의 빠른 성장에 의한 녹색 파장대 앞쪽과 파란색 파장대에서 흡수가 일어나는 한편, 녹색 파장대에서 급격히 반사되는 이론에 의해 만들어졌

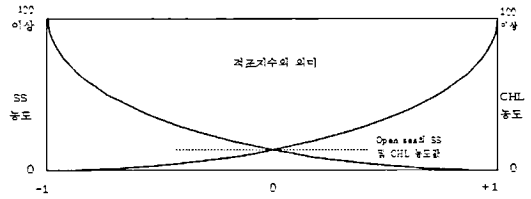


Fig. 14. The diagram for relationship among redtide index, chlorophyll-a concentration and suspended solid particle concentration.

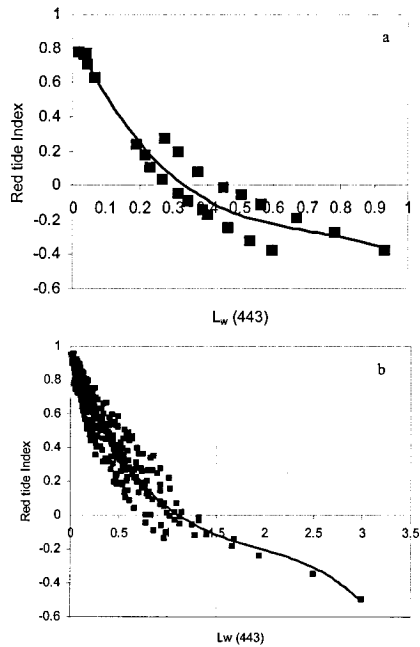


Fig. 15. (a) Scatterplot of RI calculated using Eq.(10) versus L_w at 443 nm for data N=25. (b) Scatterplot of RI calculated using Eq.(10) versus L_w at 443 nm for data N=375. Note that RI progressively increased with the decrease of L_w at 443 nm (from Ahn and Shanmugam, 2006).

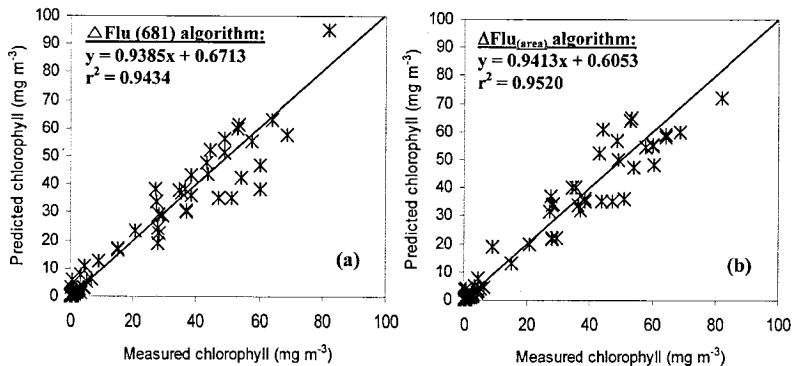


Fig. 13. Comparison between the measured and predicted chlorophyll-a concentrations (from Ahn and Shanmugam, 2007).

다. 즉 파란색과 녹색 파장대 사이의 직접적인 광량비 대신, 파장 443 nm의 수출복사량과 $L_w(510)/L_w(555)$ 의 비 값을 혼합하여 만들어졌으며 그 식은 다음과 같다.

$$RI = \frac{[L_w(510)/L_w(555) - L_w(443)]}{[L_w(510)/L_w(555) + L_w(443)]} \quad (10)$$

적조지수는 -1부터 +1까지의 값을 갖는다. -1의 값은 적조가 없고 부유물 농도가 아주 높음을 의미하며, +1의 가까운 값을 가질수록 적조의 농도는 높고 부유물의 농도는 낮음을 의미한다(Fig. 14).

Fig. 15a는 식(10)에서 산출된 적조지수와 파장 443 nm에서의 수출복사량 값의 상관관계를 분석한 그림이다. 상관계수는 0.94로 매우 좋은 결과를 보였으며 따라서 적조지수는 식(11)와 같이 변형되어 산출될 수 있으며 X는 파장 443 nm에서의 수출복사량($L_w(443)$)이다.

$$RI_{(D1)} = 10^{(-2.4394 \times X^3 + 5.2587 \times X^2 - 4.117 \times X + 0.8782)} \quad (11)$$

식(11)은 적조해역의 현장관측자료만 사용하여 얻은 식이며 한반도 주변 해역에서 현장관측한 모든 자료들을 사용하면 Fig. 15b와 같다. 이때 상관계수는 0.92로 약간 감소되었지만 높은 상관도를 유지하였다. 따라서 GOCI 적조분석 알고리즘은 다음과 같다.

$$RI_{(D1)} = 10^{(-0.1069 \times X^3 + 0.6259 \times X^2 - 1.3936 \times X + 0.919)} \quad (12)$$

여기서 X는 파장 443 nm에서의 수출복사량 값이다.

Fig. 16은 SeaWiFS 자료를 이용하여 적조지수 알고리즘을 적용한 결과를 국립수산과학원의 적조정보 및 SeaWiFS 표준 엽록소 농도 산출 알고리즘과 비교한 그림들이다. 그림에서 적조지수는 적조가 발생한 해역에서 높은 값을 보였고, 탁한 해역과 맑은 해역에서는 낮은 값을 보였다. 이것은 국립수산과학원이 제공한 자료에 표시된 적조발생지역과 일치한다. 그에 비해 SeaWiFS 엽록소 농도 자료는 적조발생해역 외에 연안해역에서도 높은 엽록소 농도 분포를 나타냈고 적조발생해역의 구분이 명확하지 않았다.

4. 결론 및 토의

한반도 주변 해역의 현장관측자료를 이용하여 GOCI 해수환경 분석 알고리즘들을 개발하였다. GOCI Chl-a 알고리즘을 개발하기 위하여, 첫 번째 방법은 두 개의 원격반사도 밴드비와 엽록소 농도의 상관관계를 분석하였다. $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 와 $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 밴드비들

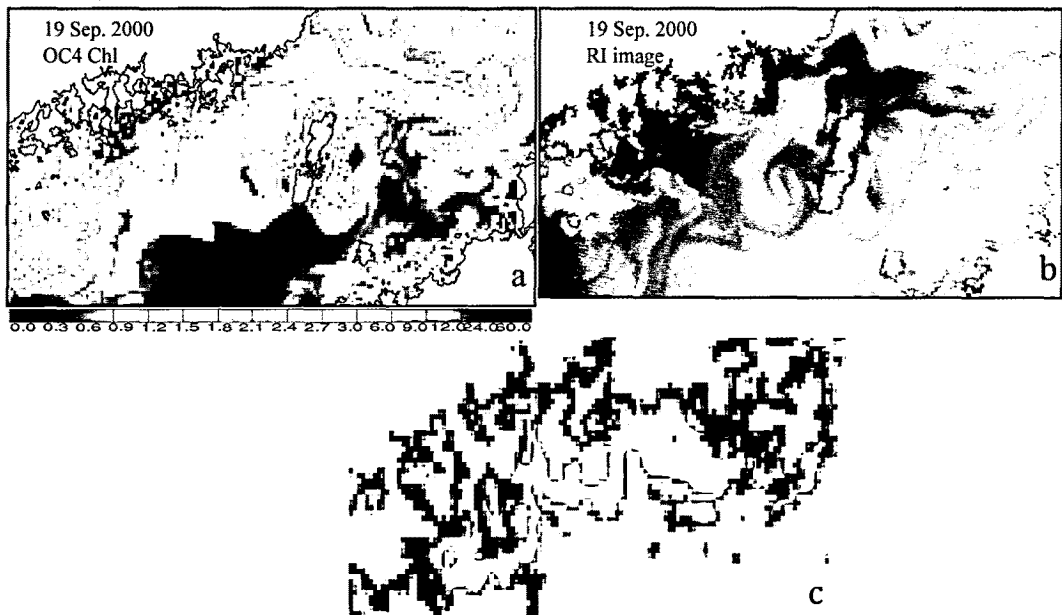


Fig. 16. Comparison between OC4-Chl-a (a) and RI (b) from SeaWiFS image of 19 September 2000 in the Korea South Sea. The (c) image is red tide information obtained from NFRDI in same date (from Ahn and Shanmugam, 2006).

에 대한 엽록소 농도와 상관관계는 상당히 낮았다. 이것은 엽록소 농도 산출에 대한 간섭요인 중 하나인 부유물의 영향만 고려한 원격반사도 밴드비 조합형태이고, 또 다른 간섭요인인 용존유기물의 영향은 고려하지 않은 형태에서 기인한다(Schalles, 2006). 두 번째 방법은 412 nm, 443 nm, 490 nm, 555 nm 네 개의 밴드를 복합적으로 조합한 원격반사도 밴드비와 엽록소 농도의 상관관계를 분석하였다. 네 개의 원격반사도 밴드비와 엽록소 농도의 상관계수는 0.79로 두 개의 원격반사도 밴드비의 상관계수보다 높았다. 이것은 엽록소 농도 산출에 대한 간섭요인들 중에서 부유물과 용존유기물의 영향을 모두 고려한 복합적인 원격반사도 밴드비 조합 형태에 기인한 것이라고 생각된다. 따라서 GOCI Chl-a 알고리즘은 경험적인 방법으로 부유물과 용존유기물의 영향을 모두 고려한 네 개의 원격반사도 밴드비 형태로 개발되었다. 개발된 GOCI Chl-a 알고리즘은 다른 알고리즘들(OC4v4, OC2v2, YOC Chl-a)과 함께 현장자료와의 상관성을 분석하였다. GOCI Chl-a 알고리즘을 사용했을 경우의 RMSE 값은 0.19로 다른 알고리즘들보다 낮은 수치를 보였다. 이것은 GOCI Chl-a 알고리즘이 다른 알고리즘들보다 현장관측자료에 근사한 값을 산출한다고 사료된다. SeaWiFS 해상위성자료에 적용했을 때, GOCI Chl-a 알고리즘은 OC4v4와 OC2v2 알고리즘들보다 평균 46% 정도 감소된 엽록소 농도 값을 산출하였다. 이것은 한반도 주변 해역에서 OC4v4와 OC2v2 알고리즘은 용존유기물의 영향으로 엽록소 농도를 과대추정하였고(Schalles, 2006; 문정연 등, 2008), GOCI Chl-a 알고리즘은 OC4v4와 OC2v2 알고리즘들보다 한반도 주변 해역에서 용존유기물의 영향에 의한 엽록소 농도의 과대추정효과가 감소되었기 때문이라고 생각된다. 따라서 한반도 주변 해역의 해수 광특성은 용존유기물의 흡광계수가 주요 인자로 작용한다고 생각되며, 추후 이에 대한 심층연구를 진행할 예정이다. 해상위성자료의 엽록소 농도는 대기보정에 의해서도 과대추정될 수 있다. 그러나 본 연구에서 사용된 해상위성자료들은 모두 동일한 대기보정 방법을 적용하였기 때문에 그 효과는 없다고 사료된다. YOC Chl-a 알고리즘이 연안해역이나 탁도가 높은 해역에서 GOCI Chl-a 알고리즘보다 감소된 엽록소 농도 분포 패턴을 보여주었다. 이것은 YOC Chl-a 알고리즘의 엽록소 농도 과소추

정효과로 사료되지만 추후 심층연구가 필요하다.

GOCI SS 알고리즘을 개발하기 위하여, 첫 번째 방법으로 부유물 농도와 원격반사도 밴드비의 상관관계를 분석하였다. 엽록소 농도 산출에 사용되는 일반적인 두 개의 원격반사도 밴드비들을 사용하였는데, 부유물 농도와 상관관계가 평균 0.39로 낮았다. 이것은 한반도 주변 해역에서 보편적인 원격반사도 밴드비를 활용한 부유물 농도 산출은 적절하지 못한 방법이라고 생각되며, Ahn *et al.*(2001)의 연구내용과 일치된다. 두 번째 방법으로 Ahn *et al.*(2001)의 원격반사도 단일밴드 방법을 이용하여 $R_{rs}(555)$ 와 부유물 농도의 상관관계를 분석하였다. 상관계수는 0.75로 원격반사도 밴드비보다 약 1.9배 정도 향상되었다. 따라서 GOCI SS 알고리즘은 원격반사도 단일밴드 방법을 이용하여 경험적인 방법으로 개발하였고 한반도 주변 해역에 최적화시켰다. 개발된 GOCI SS 알고리즘은 Ahn *et al.*(2001)의 알고리즘보다 약 10% 정도 향상된 상관계수를 나타냈다. GOCI SS, Clark TSM, YOC TSM 알고리즘들을 사용했을 경우의 현장관측자료와의 상관성을 분석하였다. GOCI SS 알고리즘을 사용했을 경우의 RMSE 값은 0.28로 다른 알고리즘들보다 낮았다. 이것은 한반도 주변 해역에서 원격반사도 단일밴드 방법이 밴드비 방법보다 좀 더 효율적으로 부유물 농도를 산출할 수 있다고 사료되지만, 추후 이에 대한 심층연구가 필요하다.

GOCI 용존유기물 산출 알고리즘을 개발하기 위하여, $a_{dom}(\lambda)$ 와 두 개의 원격반사도 밴드비들의 상관관계를 분석하였다. $a_{dom}(400)$ & $a_{dom}(412)$ 와 두 개의 원격반사도 밴드비들의 상관계수들 중에서 $a_{dom}(400)$ 와 $R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$ 의 상관계수가 0.72이고, $a_{dom}(412)$ 와 $R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$ 의 상관계수가 0.73으로 다른 밴드비들보다 상관계수가 높았다. 따라서 GOCI 용존유기물 산출 알고리즘은 두 개의 원격반사도 밴드비를 기반으로 $a_{dom}(400)$ 과 $a_{dom}(412)$ 값을 산출하는 알고리즘을 경험적인 방법으로 개발하였고, 한반도 주변 해역에 최적화시켰다. 개발된 GOCI 용존유기물 산출 알고리즘들과 현장관측자료와의 상관성을 분석하였다. GOCI 용존유기물 산출 알고리즘의 RMSE 값은 모두 0.18로 YOC 용존유기물 산출 알고리즘보다 낮았다. 이것은 원격반사도 밴드비 구성에서 용존유기물 탐지에 적합한 412 nm 파장대의 사용여부에 의한 것으로 사료된다.

GOCI 엽록소 형광 알고리즘과 GOCI 적조분석 알고리즘의 개발은 Ahn and Shanmugam(2007)와 Ahn and Shanmugam(2006)의 연구들에 의해 각각 이루어졌다. GOCI 엽록소 형광 알고리즘은 FLH 개념을 바탕으로 681 nm에서의 형광신호의 최대 높이($\Delta Flu(681)$)와 형광신호 곡선에 의해 만들어지는 면적($\Delta Flu_{(area)}$)에 기반하여 개발되었다. 유효성 검증에서 평균 0.95의 상당히 높은 상관계수를 보였는데 이것은 부유물과 용존유기물 등의 엽록소 농도 산출에 대한 간섭요인의 영향이 전혀 없었기 때문이다. 따라서 GOCI 엽록소 형광 알고리즘은 한반도 주변 연안해역에서의 엽록소 농도 산출시 활용하면 매우 효율적이라고 생각된다. GOCI 적조분석 알고리즘은 파장 443 nm, 510 nm, 555 nm의 수출복사량의 비 값으로 만들어지는 적조지수와 파장 443 nm의 수출복사량과의 상관관계를 통해 개발되었다. 적조지수는 적조발생해역과 탁한 해역을 구분하는 지표로 활용할 수 있어서 위성자료를 이용한 한반도 주변 연안해역에서의 적조 탐지가 가능할 것으로 사료된다.

GOCI의 성공적인 발사가 이루어지면, 추후 GOCI 자료의 검보정 연구를 통해 개발된 알고리즘들의 문제점을 분석하고 지속적인 한반도 주변 해역의 현장관측 자료 업데이트를 통해 알고리즘들의 개선작업이 이루어질 것이다. 또한 반분석적인 방법, 분석적인 방법, 인공신경망 방법 등의 다양한 알고리즘 개발 방법들을 적용하여 이론적인 접근을 통한 향상된 성능을 보여주는 새로운 알고리즘의 개발도 필요하다.

사 사

본 연구는 국토해양부의 정지궤도 해양위성(GOCI) 활용연구지원 사업(PM55660)과 한국해양연구원의 해양위성센터 운영 및 기능고도화 사업(PE98492)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

문정언, 안유환, 최중기, 2002. 우리나라 주변 해역에 대한 SeaWiFS chlorophyll 표준 알고리즘의 적

합성 연구. 2002 한국해양학회 추계학술발표대회 논문집, 한양대학교, 11월14일-15일, pp. 103-107.

문정언, 안유환, 유주형, 양찬수, 최중기, 2005. "CASE-II water" 클로로필 알고리즘 개발을 위한 클로로필, 부유물, 용존유기물의 해양광학 적 상관관계 분석. 2005 한국해양학회 추계학술 발표대회 논문집, 한국해양연구원, 11월03일-04일, pp. 246-250.

문정언, 유주형, 안유환, 민지은, 최중기, 2008. 황동중국해 엽록소 산출 알고리즘 개발에 관한 연구. 2008 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, 제주ICC, 5월29일-30일, pp. 202.

안유환, 유신재, 석문식, 이홍재, 염기대, 이동영, 장만, 신경순, 문정언, 1999. 위성에 의한 적조 및 해수 탁도 원격탐사 기술개발. 한국해양연구소, BSPE98721-00-1224-01.

안유환, 문정언, 서원찬, 윤홍주, 2009. 해색원격탐사 활용을 위한 적조생물종 고유 광특성 연구. 한국해양환경공학회지, 12(1): 45-54.

Ahn, Y. H., J. E. Moon, and S. Gallegos, 2001. Development of suspended particulate matter algorithms for ocean color remote sensing. *Korean Journal of Remote Sensing*, 17(4): 285-295.

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., P. Shanmugam, K. I. Chang, J. E. Moon, and J. H. Ryu, 2005. Spatial and temporal aspects of phytoplankton blooms in complex ecosystems off the Korean coast from satellite ocean color observations. *Ocean Science Journal*, 40(2): 67-78.

Ahn, Y. H. and P. Shanmugam, 2006. Detecting the red tide algal blooms from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia Coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 103(4): 419-437.

- Ahn, Y. H., P. Shanmugam, J. H. Ryu, and J.C. Jeong, 2006. Satellite detection of harmful algal bloom occurrence in Korean waters. *Harmful Algae*, 5(2): 213-231.
- Ahn, Y. H. and P. Shanmugam, 2007. Derivation and analysis of the fluorescence algorithms to estimate phytoplankton pigment concentrations in optically complex coastal waters. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 9(4): 352-362.
- Bricaud, A., A. Morel, and L. Prieur, 1981. Absorption by dissolved organic matter in the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnology and Oceanography*, 26(1): 43-53.
- Carder, K. L. and R. G. Steward, 1985. A remote-sensing reflectance model of a red-tide dinoflagellate off west Florida. *Limnology and Oceanography*, 30(2): 286-298.
- Carder, K. L., R. G. Steward, G. R. Harvey, and P. B. Ortner, 1989. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnology and Oceanography*, 34(1): 68-81.
- Carder, K. L., S. K. Hawes, K. A. Baker, R. C. Smith, R. G. Steward, and B.G. Mitchell, 1991. Reflectance model for quantifying chlorophyll a in the presence of productivity degradation products. *Journal of Geophysical Research*, 96(C11): 20599-20611.
- Carder, K. L., F. R. Chen, Z. P. Lee, S. K. Hawes, and D. Kamykowski, 1999. Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophylla and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 104(C3): 5403-5421.
- Carder, K. L., F. R. Chen, J. P. Cannizzaro, J. W. Campbell, and B. G. Mitchell, 2004. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. *Advances in Space Research*, 33(7): 1152-1159.
- Corsini, G., R. Grasso, and P. Cipollini, 2002. Regional bio-optical algorithms for the Alboran Sea from a reflectance model and in situ data. *Geophysical Research Letters*, 29(15), 1739, 10.1029/2001GL013861.
- Darecki, M. and D. Stramski, 2004. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment*, 89(3): 326-350.
- Doerffer, R. and J. Fischer, 1994. Concentrations of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff in case II waters derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods. *Journal of Geophysical Research*, 99(C4): 7457-7466.
- Doerffer, R. and H. Schiller, 2007. The MERIS Case 2 water algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3-4): 517-535.
- Garver, S. A. and D. Siegel, 1997. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation 1. Time series from the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research*, 102(C8): 18607-18625.
- Gohin, F., J. N. Druon, and L. Lampert, 2002. A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8): 1639-1661.
- Gordon, H. R. and A. Morel, 1983. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review. In: *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, edited by Barker, R. T., N. K. Mooers, M. J. Bowman and B. Zeitzschel, Springer-Verlag, New York.
- Hansell, D. A. and C. A. Carlson, 2002. *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. Academic Press.
- Hu, C., F. E. Muller-Karger, C. J. Taylor, K. L. Carder, C. Kelble, E. Johns, and C. A. Heil,

2005. Red tide detection and tracing using MODIS Fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 97(3): 311-321.
- Huot, Y., C. A. Brown, and J. J. Cullen, 2005. New algorithms for MODIS sun-induced chlorophyll fluorescence and a comparison with present data products. *Limnology and Oceanography: Methods*, 3: 108-130.
- Kahru, M. and B. G. Mitchell, 1999. Empirical chlorophyll algorithm and preliminary SeaWiFS validation for the California Current. *International Journal of Remote Sensing*, 20(17): 3423-3429
- Kirk, J. T. O., 1994. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge University Press.
- Lee, Z. P., K. L. Carder, and R. Arnone, 2002. Deriving inherent optical properties from water color: A multi-band quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 41(21): 5755-5772.
- Lee, Z. P., K. P. Du, and R. Arnone, 2005. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance. *Journal of Geophysical Research*, 110, C02016, doi:10.1029/2004JC002275.
- Letelier, R. M. and M. R. Abbott, 1996. An analysis of chlorophyll fluorescence algorithms for the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *Remote Sensing of Environment*, 58(2): 215-223.
- Loise, H. and A. Morel, 1998. Light scattering and chlorophyll concentration in case 1 waters: A reexamination, *Limnology and Oceanography*, 43(5): 847-858.
- Maritorena, S., D. A. Siegel, and A. R. Peterson, 2002. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Applied Optics*, 41(15): 2705-2714.
- Meroni, M., M. Rossini, L. Guanter, L. Alonso, U. Rascher, R. Colombo, and J. Moreno, 2009. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Review of methods and applications. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2037-2051.
- Miller, R. L., C. E. D. Castillo, and B. A. McKee, 2005. *Remote Sensing of Coastal Aquatic Environments*. Springer.
- MODIS ATBD Report, 1997. *Bio-Optical Algorithms-Case 1 Waters*. edited by Clark, D.K.
- Morel, A. and L. Prieur, 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22(4): 709-722.
- O'Reilly, J. E., S. Maritorena, B. G. Mitchell, D. A. Siegel, K. L. Carder, S. A. Garver, M. Kahru, and C. McClain, 1998. Ocean color chlorophyll algorithm for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103(C11): 24937-24953.
- Pradhan, Y., A. V. Thomaskutty, A. S. Rajawat, and S. Nayak, 2005. Improved regional algorithm to retrieve total suspended particulate matter using IRS-P4 ocean colour monitor data. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 7(7): 343-349.
- Schalles, J. F., 2006. Optical remote sensing techniques to estimate phytoplankton chlorophyll a concentration in coastal waters with varying suspended matter and CDOM concentrations. *In: Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes*, edited by Richardson, L.L. and E.F. LeDrew, Springer, pp.27-79.
- Schiller, H. and R. Doerffer, 1999. Neural network for emulation of an inverse model-operational derivation of Case II water properties from MERIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9): 1735-1746.
- Shanmugam, P., Y. H. Ahn, and P. S. Ram, 2008. SeaWiFS sensing of hazardous algal blooms and their underlying mechanisms in shelf-slope waters of the Northwest Pacific during summer. *Remote Sensing of Environment*,

112(8): 3248-3270.

- Siswanto, E., J. Tang, Y. H. Ahn, J. Ishizaka, S. J. Yoo, S. W. Kim, Y. Kiyomoto, K. Yamada, C. Chiang, and H. Kawamura, 2010. Ocean color algorithms to retrieve chlorophyll-a, total suspended matter and colored dissolved organic matter absorption coefficient in the Yellow and East China Seas. (in preparation).
- Tang, D. L., H. Kawamura, H. Doan-Nhu, and W. Takahashi, 2004. Remote sensing oceanography of a harmful algal bloom off the coast of southeastern Vietnam. *Journal of Geophysical Research*, 109, C03014, doi:10.1029/2003JC002045.
- Tassan, S., 1988. The effect of dissolved "yellow substance" on the quantitative retrieval of chlorophyll and total suspended sediment concentrations from remote measurements of water colour. *International Journal of Remote Sensing*, 9(4): 787-797.
- Tassan, S., 1994. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. *Applied Optics*, 33(12): 2369-2378.
- Zhang, M., J. Tang, Q. Dong, Q. T. Song, and J. Ding, 2010. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114(2): 392-403.