

동해에서 해색센서를 이용한 CDOM추정 알고리즘 검증

김윤정* · 김현철**† · 손영백*** · 박미옥* · 신우철* · 강성원* · 노태근****

*부경대학교 해양학과, **극지연구소 극지기후연구부,

한국해양과학기술원 해양위성센터, *부산대학교 해양연구소/해양학과

Verification of CDOM Algorithms Based on Ocean Color Remote Sensing Data in the East Sea

Yun-Jung Kim*, Hyun-Cheol Kim**†, Young-Baek Son***, Mi-Ok Park*, Woo-Chur Shin*,
Sung-Won Kang* and Tae-Keun Rho****

*Department of Oceanography, Pukyong National University, Daeyeon-dong, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

**Division of Polar Climate Research, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea

***Korea Ocean Satellite Center (KOSC), KIOST, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

****Marine Research Institute/Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 609-725, Korea

Abstract : Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) is one of the important components of optical properties of seawater to determine ecosystem dynamics in a given marine area. The optical characteristics of CDOM may depend on the various ecosystem and environmental variables in the sea and those variables may vary region to region. Therefore, the retrieval algorithm for determining light absorption coefficient of CDOM (a_{CDOM}) using satellite remote sensing reflectance (R_{rs}) developed from other region may not be directly applicable to the other region, and it must be validated using an *in-situ* ground-truth observation. We have tested 6 known CDOM algorithms (three Semi-analytical and three Empirical CDOM algorithms) developed from other regions of the world ocean with laboratory determined *in-situ* values for the East Sea using field data collected during seven oceanographic cruises in the period of 2009~2011. Our field measurements extended from the coastal waters to the open oceanic type CASE-1 Waters. Our study showed that Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v5) derived $a_{CDOM}(412)$ appears to match *in-situ* $a_{CDOM}(412)$ values statistically. Semi-analytical algorithms appeared to underestimate and empirical ones overestimated a_{CDOM} in the East Sea. $a_{CDOM}(412)$ value was found to be relatively high in the relatively high satellite derived-chlorophyll-a area. $a_{CDOM}(412)$ value appears to be influenced by the amount of chlorophyll-a in seawater. The outcome of this work may be referenced to develop a_{CDOM} algorithm for the new Korean Geostationary Ocean Color Imager (GOCI).

Key Words : Colored Dissolved Organic Matter (CDOM), CDOM Algorithm, the East Sea, MODIS, GOCI

접수일(2012년 7월 15일), 수정일(1차 : 2012년 8월 10일), 게재확정일(2012년 8월 13일).

† 교신저자: 김현철(kimhc@kopri.re.kr)

요약 : 동해에서 CDOM의 광학적 특성과 순환을 이해하기 위하여 MODIS의 원격탐사반사도(R_{rs})를 이용한 기존의 CDOM 흡광계수 추정 알고리즘들(Semi-Algorithms (3개), Empirical-Algorithms (3개))을 현장관측 자료와 비교 평가하였다. 2009년부터 2011년까지 총 7번의 현장 관측 자료는 연안 해역에서부터 외양의 다양한 해양환경을 포함하고 있다. 본 연구 결과, 동해에서 Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v5) 이 현장 $a_{CDOM}(412)$ 값을 가장 유사하게 추정하였다. Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v5) 알고리즘을 기준으로 Semi-analytical 알고리즘은 과소추정하는 경향을 보였다. 그러나 Empirical 알고리즘은 과대추정하는 경향을 보였다. $a_{CDOM}(412)$ 의 값이 높은 곳에서 위성관측 엽록소-a (Chlorophyll-a)의 값도 높았다. 이 결과는 CDOM이 엽록소-a의 함량 추정에 영향을 줄 수 있다는 가능성을 제시한다. 본 연구 결과는 세계최초 정지궤도 해상위성인 GOCI의 CDOM 알고리즘을 개선하는데 기초자료로 활용될 것이다.

1. 서론

해수에 존재하는 용존유기물질의 일종인 Colored Dissolved Organic Matter (CDOM)은 연안에서는 주로 육지의 담수, 오수, 퇴적물 등으로부터 공급되며, 외양역에서는 주로 박테리아에 의한 식물플랑크톤의 분해나 동물플랑크톤의 배설물, 동물플랑크톤을 비롯한 동물들의 Sloppy Feeding 등으로 생성되는 것으로 알려져 있다(Urban-Rich, 1999). CDOM은 주로 태양광에 의해서 약 57~84%가 분해되며 (Moran *et al.*, 2000; Zanardi-Lamardo *et al.*, 2002), 플랑크톤도 CDOM의 분해에 기여하는 것으로 알려져 있다(Hessen *et al.*, 1994; Morris and Hargreaves, 1997; Nelson *et al.*, 1998). CDOM의 광학적 특성은 자외선(UV-A, UV-B)과 청색 파장대의 빛을 흡수하여 유해한 자외선으로부터 수중생태계를 보호하지만, 동시에 광합성 유효광(photosynthetically available light, PAR)을 감소시키기 때문에 해양 생태계의 주요 변수이기도 하다(Robert *et al.*, 1993; Gibson *et al.*, 2000; Williamson *et al.*, 1996).

동해에서 용존유기물질의 거동이나 순환을 정량적으로 파악하기 위해서는 CDOM의 시/공간적인 분포 (생성, 소멸, 이동 등)에 관한 자료가 필요하다. 일반적으로 바다의 색은 그 해역에 존재하는 살아있는 식물플랑크톤과 그에 의한 산물(유기성 쇄설물, 동물플랑크톤의 섭식 파편, 분해 중인 파편), 그리고 토양기원의 무기성 부유 물질에 의해 주로 결정된다. 동해는 무기성 부유물질이 비교적 적은 Case-1 Water로 분류된다(Gordon and Morel, 1983; Morel and Prieur, 1977; Yoo *et al.*, 2002; 문정연 외, 2010). Urban-Rich (1999)의 연구에 의하면 Case-1 Water에서 CDOM은 주로 박테리아에

의한 식물플랑크톤의 분해나 동물플랑크톤의 배설물 등에 의해 생성된다(Urban-Rich, 1999; Nelson and Siegel, 2002).

CDOM의 중요한 생성 요인 중 하나인 식물플랑크톤은 적절한 환경(빛과 영양염)이 주어질 때 마다 빠른 성장 속도를 보이며(홍기훈 외, 2011), 적절한 환경이 되면 대량 번성하기 때문에(Biddanda and Benner, 1997; McAllister *et al.*, 1961) 큰 시/공간적 변동을 보인다. 이러한 식물플랑크톤 성장의 시/공간적 변화는 CDOM의 흡광도 값과 분포 그 순환에 크게 영향을 미치게 된다.

광범위 규모의 CDOM 분포를 시/공간에 따라 정확히 파악하고 정량화하기 위해서는 원격탐사자료를 활용하는 것이 필수이다. 그리고 동해는 우리나라, 북한, 러시아 및 일본으로 둘러싸여 있어서 상대국 해역에 대한 쉽지 않은 접근성으로 현장조사가 제한적이기 때문에 위성을 통한 해양조사가 거의 유일한 방법이다(홍기훈 외, 2011).

단파장대에서 CDOM의 빛 흡수는 식물플랑크톤의 생체량에 의한 빛 흡수와 중복되므로 원격탐사반사도(Remote sensing reflectance: R_{rs})를 이용한 엽록소-a (Chlorophyll-a)농도 추정에 상당한 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Carder *et al.*, 1991, 1999; Garver and Siegel, 1997; Kahru and Mitchell, 2001; O'Reilly *et al.*, 1998). 특히 Nelson *et al.* (1998)의 연구에 의하면 CDOM에 의한 빛의 흡수가 식물플랑크톤 생체를 포함한 입자성 유기물에 의한 흡수 총량 중 10~70%를 차지하는 것으로 알려졌다. CDOM을 입자성 유기물과 분리하려는 노력은 해양의 1차 생산력 측정과 CDOM의 분포에 관한 지식의 진보를 가져와서, 현재 CDOM 알고리즘의 개선에 관한 많은 연구가 이루어

지고 있다(Blough and Del Vecchio, 2002; Carder *et al.*, 1991, 1999; Garver and Siegel, 1997; Hochman *et al.*, 1995; Hoge *et al.*, 1999).

1978년부터 9년간에 걸친 NIMBUS-7의 Coastal Zone Color Scanner (CZCS)가 전지구의 해양 식물플랑크톤의 분포를 정량적으로 보여줌으로써 그 이후 해색위성관측은 활발하게 이루어지고 있다. 일본의 ADEOS 위성 에 탑재된 해색센서 Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS)가 1996년 8월부터 1997년 6월까지 운용되었고, 1997년 9월부터 Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS)와 그 이후 MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 그리고 ESA의 MEdium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) 해색위성이 전 지구의 해양의 해색을 관측하고 있다. 극궤도 위성에 탑재된 CZCS, OCTS, SeaWiFS, MODIS 그리고 MERIS와는 달리 최근 우리나라에서 세계 최초 정지궤도 해색위성인 Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)를 개발하여 2010년 6월부터 현재까지 운용 중이다.

GOCI 운영팀에서는 해색위성을 통한 광범위한 영역의 해양 자료 획득 및 분석을 위한 위성자료 처리 방법을 다양한 각도에서 개발하고 있다. 이 중 CDOM의 흡광계수 분석 알고리즘들은 반분석적(semi-analytic) 방법을 이용한 Carder Semi-Analytic Algorithm (Carder 알고리즘, Carder *et al.*, 1999)과 Garver-Siegel-Maritorena Semi-Analytical Algorithm (GSM 알고리즘, Garver and Siegel, 1997; Maritorena *et al.*, 2002), 경험적(Empirical) 방법을 이용한 Quasi-Analytical Algorithm (QAA 알고리즘, Lee *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2005)등의 알고리즘들을 이용한다(문정언 외, 2010). 한반도 주변 해역에서는 Yellow Sea Large Marine Ecosystem (YSLME) Ocean Color Work Group (YOC CDOM 알고리즘, Siswanto *et al.*, 2011)과 GOCI CDOM 알고리즘(문정언 외, 2010)이 담수유입이 많은 서해 및 동중국해(Case-2 Water)에 대하여 개발되어 있다. 그러나 현재까지도 동해(Case-1 Water)에 적합한 CDOM 알고리즘은 개발되지 못하고 있는 실정이다. 동해에서 해색위성을 통한 CDOM의 신뢰성 높은 데이터를 확보하고, 장/단기 모니터링 및 역할을 이해하기 위해서는 현재 사

용하고 있는 기존 CDOM 알고리즘의 비교 및 검증이 요구 된다.

본 연구의 목적은 동해의 용존유기물질의 순환을 이해하기 위해 현장 관측한 자료를 이용하여 기존 CDOM 추정 알고리즘들을 비교 및 검증하고 동해에 적합한 CDOM 알고리즘을 찾는 것이다. 이 연구는 GOCI를 이용한 동해에서의 CDOM 관측 기반 구축과 용존유기물질의 순환을 이해하는데 도움이 될 것이다.

2. 재료 및 방법

1) 현장조사

조사해역은 위도 34.90 °N~37.88 °N, 경도 129.12 °E~131.44 °E에 위치하며, 총 191개의 정점에서 관측이 수행되었다(Fig. 1). 조사 기간은 2009년 여름철(8월 8일~18일), 2010년 여름철(6월 21일~23일, 7월 12일~13일, 8월 17일~18일), 2011년 겨울, 봄 그리고 여름철(2월 23일~3월 5일, 5월 17일~22일, 7월 25일~26일)에 관측이 수행되었다(Table 1). CDOM 샘플 채집을 위해서 해수는 각 조사선에 장착된 SBE 911 plus CTD의 Rosette sampling system에 장착된 10L Niskin Bottle를 이용하여 채수하였다.

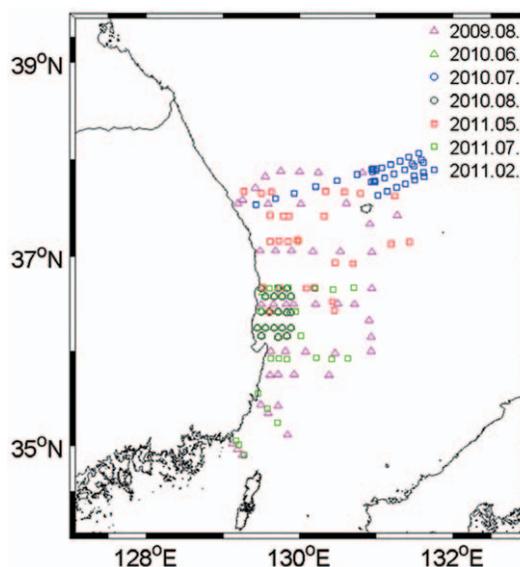


Fig. 1. Map of data sampling stations.

Table 1. The observation schedule during 2009~2011

Number	Time Period	Sampling Platform	Number of Stations	Latitude	Longitude
1	2009.8.2~18	Haeyang 2000	45	34.90~37.88	129.12~131.13
2	2010.6.21~23	Tamyang	21	36.15~36.67	129.45~129.89
3	2010.7.12~13	Tamyang	21	36.15~36.67	129.45~129.89
4	2010.8.17~18	Tamyang	21	36.42~36.67	129.45~129.85
5	2011.2.23~3.5	Onnuri	28	36.42~37.68	129.27~131.44
6	2011.5.17~22	Tamyang	28	36.42~37.68	129.27~131.44
7	2011.7.25~26	Tamyang	27	34.90~36.67	129.28~130.72

2) CDOM 흡광도 분석

CDOM을 측정하기 위한 전처리 과정으로 여과지와 시료병의 오염을 최소화하기 위해 약 450℃에서 6시간 동안 유기물을 연소시켰다. 여과지는 25 mm GF/F 여과지(공경 0.45 μm)를 이용하였으며, Mitchell *et al.* (2000)의 방법을 참고하여 제작한 여과장치를 이용하였다. 50 ml 여과 후 알루미늄 호일로 싸서 측정 전까지 4℃에서 냉장 보관하였다. 분석은 Cary 100 spectrophotometer (Varian)를 이용하였으며, 분석 조건은 10 cm 원형 큐벳(25 ml)을 사용하여 측정 파장 200~800 nm까지 1 nm 간격으로 측정하였다. 기기 자체의 오차를 제거하기 위해 Milli-Q water를 blank로 이용해 baseline correction을 하며, 최종적으로 측정된 흡광도에서 유기물의 흡광이 거의 일어나지 않는 750 nm의 흡광도 값을 뺀 후, 다음 식을 이용해 용존 유기물질의 흡광계수(a_{CDOM})를 계산하였다.

$$a_{CDOM} = \alpha(\lambda) \times 2.303/r \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

여기서, $\alpha(\lambda)$ 는 파장 λ 에 대한 용존 유기물의 흡광도 값이며, r 은 cell에 대한 path length이다(Ahn *et al.*, 2008; Blough and Del Vecchio, 2002; Mannino *et al.*, 2008). 2.303은 상용대수 함수인 흡광도 값을 자연대수 함수인 흡광계수로 변환하기 위한 상수 값이다. 본 실험에서는 연구 목적에 맞는 흡광도 값을 412 nm 기준으로 전과 후 15 nm씩 평균하였으며, 이 후부터 CDOM 412 nm의 흡광도 값을 $a_{CDOM}(412)$ 로 표기하겠다.

3) 해석위성 자료 추출

MODIS 해석위성 자료는 NASA Ocean Biology Processing Group (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)으로부터 Level 2 자료를 제공 받아 'NASA 해석

위성자료' 전용처리 프로그램인 SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS)을 이용하여 1 km 해상도를 가지는 Standard Mapping Imager (SMI) 생산하였다(McClain *et al.*, 2004). Level 2 자료 중에서 가시광선 영역의 원격탐사반사도 (Remote-sensing reflectance: R_{rs} ,) 자료는(412, 443, 488, 531, 555, 667, 678 nm) $a_{CDOM}(412)$ 를 추정하는데 사용하였고, 그 결과를 현장관측 자료와 비교 및 검증 하였다.

현장자료와 위성자료간의 관측시기를 일치시키기 위해 Son *et al.* (2009)의 연구에서 제안되었던 자료추출 방법을 이용하였다. 현장자료와 비교를 위해 MODIS 위성자료를 현장관측 기간으로 제한하였지만, 구름에 의한 영향으로 현장자료와 위성자료 간에 동시성이 제한되는 경우 관측한 날로부터 1일 이내의 영상으로 확장하여 사용하였다. 파장별 원격탐사반사도는 관측정점을 중심으로 3×3pixel을 평균한 값을 이용하였고, 총 9개의 pixel 자료 중에서 5개(50%) 이상의 자료가 있을 경우 평균해서 사용하였다. 그리고 공간적으로(3 km×3 km) 변화가 큰 자료를 제거하기 위해서 Son *et al.* (2009)이 제시한 filter mean의 방법을 이용하여 구하였으며(평균±1.5×표준편차), 이 범위 밖의 자료는 평균할 때 제외시켰다.

4) CDOM 추정 알고리즘 검증

CDOM 추정 알고리즘 검증을 위한 현장자료는 2009년부터 2011년까지 3년간 동해 남서부 해역에서 현장 관측된 총 191개의 샘플 중 위성자료와 일치하는 48개 정점을 선별하였다. 48개의 정점을 선별한 후, 해석위성 연구에서 일반적으로 사용하고 있는 CDOM 추정 알고리즘들을 크게 두 분류 (Semi-analytic Algorithms 방법과 Empirical-Algorithms 방법)로 나누어 비교

Table 2. The comparisons of CDOM algorithms (Semi-Algorithms: Carder-Semi, GSM, QAA_v5, Empirical-Algorithms: Carder-Empirical, Tassan, GOCI)

Algorithms	Equations	Reference
Carder-semi	$a_{dg}(\lambda) = a_{dg}(400) [\exp - S_{dg}(\lambda - 400)]$	Carder <i>et al.</i> (1999, 2004)
GSM	$R_{rs}(\lambda) = \frac{t}{n_{mw}^2} \sum_{i=1}^t g_i \left\{ \frac{b_{bw}(\lambda) + BBP(\lambda_0/\lambda)^{-\eta}}{b_{bw}(\lambda) + BBP(\lambda_0/\lambda)^{-\eta} + a_w(\lambda) + Chl \times a_{ph}^*(\lambda) + CDM \exp[-S(\lambda - \lambda_0)]} \right\}$	Garver and Siegel. (1997) Maritorena <i>et al.</i> (2002)
QAA_v5	$a_{dg}(443) = \frac{(a(411) - \zeta a(443)) - (a_w(411) - \zeta a_w(443))}{\xi - \zeta}$	Lee <i>et al.</i> (2002, 2005)
Carder-empirical	$a_{dg}(443) = 10^{(0.016 - 0.185 \times \rho_{25} - 1.081 \times \rho_{35} - 1.234 \times \rho_{65})}$	Carder <i>et al.</i> (1999, 2004)
Tassan	$ag_{400} = 10^{(c_1 + c_2 \text{Log}_{10}(R) + c_3 \text{Log}_{10}^2(R))}$	Tang <i>et al.</i> (2004)
GOCI	$a_{dom}(412) + R \cdot 0.2047^{-1.3351}$	Moon <i>et al.</i> (2010)

Table 3. Equations showing frequency Error Estimates (Bias, RPD, APD, RMSE) (Siswanto *et al.*, (2011)). Where Pret, Pis and N are algorithm-retrieved bio-optical products, in-situ bio-optical products, and number of data, respectively

Error Estimates	Equations
Bias	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{ret} - P_{is})$
RPD	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_{ret} - P_{is}}{P_{is}} \right) 100$
APD	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{P_{ret} - P_{is}}{P_{is}} \right 100$
RMSE	$\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{ret} - P_{is})^2 \right]^{1/2}$

및 검증하였다. Semi-analytic Algorithms 에는 Carder-semi (Carder *et al.*, 1999, 2004), GSM (Garver and Siegel, 1997; Maritorena *et al.*, 2002) 과, QAA_v5 (Lee *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2005)가 있다. Empirical-Algorithms에는 Carder-empirical (Carder *et al.*, 1999; Carder *et al.*, 2004), Tassan (Tang *et al.*, 2004)과 GOCI (문정연 외, 2010)가 있다. Table 2는 Semi-analytic Algorithms과 Empirical-Algorithms에 대한 수식을 간략하게 나타내었다.

본 연구에서는 MODIS 위성자료를 사용하였으므로 $R_{rs}(411)$, $R_{rs}(440)$ 그리고 $R_{rs}(490)$ 값은 각각 $R_{rs}(412)$, $R_{rs}(443)$ 그리고 $R_{rs}(488)$ 으로 대체하여 사용하였다. 각각의 알고리즘에 대한 오차를 추산하고자 Siswanto *et al.* (2011)이 제시한 Bias, mean Relative Percentage

Difference (RPD, %), mean Absolute Percentage Difference (APD, %), Root Mean Square Error (RMSE)를 이용하였으며 각각의 수식을 Table 3에 나타내었다. Bias와 RPD는 현장 값의 정오차와 과대추정 또는 과소추정을 나타내고, ADP는 데이터에 대한 정확도 및 불확실성을 제시하며, RMSE는 추정값과 현장값의 차이를 다룰 때 사용하는 통계적 척도이다.

3. 결과 및 토의

1) $a_{CDOM}(412)$ 추정 알고리즘 검증

본 연구 해역에 적합한 알고리즘을 검증하기 위하여 기존에 사용하고 있는 CDOM 알고리즘에서 추정된 $a_{CDOM}(412)$ 값들과 현장에서 관측한 $a_{CDOM}(412)$ 값을 비교하였다. 사용된 기존 알고리즘은 Semi-analytic Algorithms (Carder-semi, GSM, QAA_v5)과 Empirical-Algorithms (Carder-empirical, Tassan, GOCI)으로 나누어 분석하였다. 위의 알고리즘들은 주로 SeaWiFS, MODIS 그리고 GOCI 등의 해상위성에서 CDOM의 흡광도를 추정하기 위한 것들이다. Fig. 2는 현장 $a_{CDOM}(412)$ 와 6개의 알고리즘에서 추출한 $a_{CDOM}(412)$ 의 상관관계를 분석한 그래프이며, Table 4에 오차(Bias, RPD, APD, RMSE)를 계산하여 정리하였다.

(1) Carder Semi-Analytic Algorithm

Carder-semi 알고리즘은 현장 $a_{CDOM}(412)$ 와 낮은

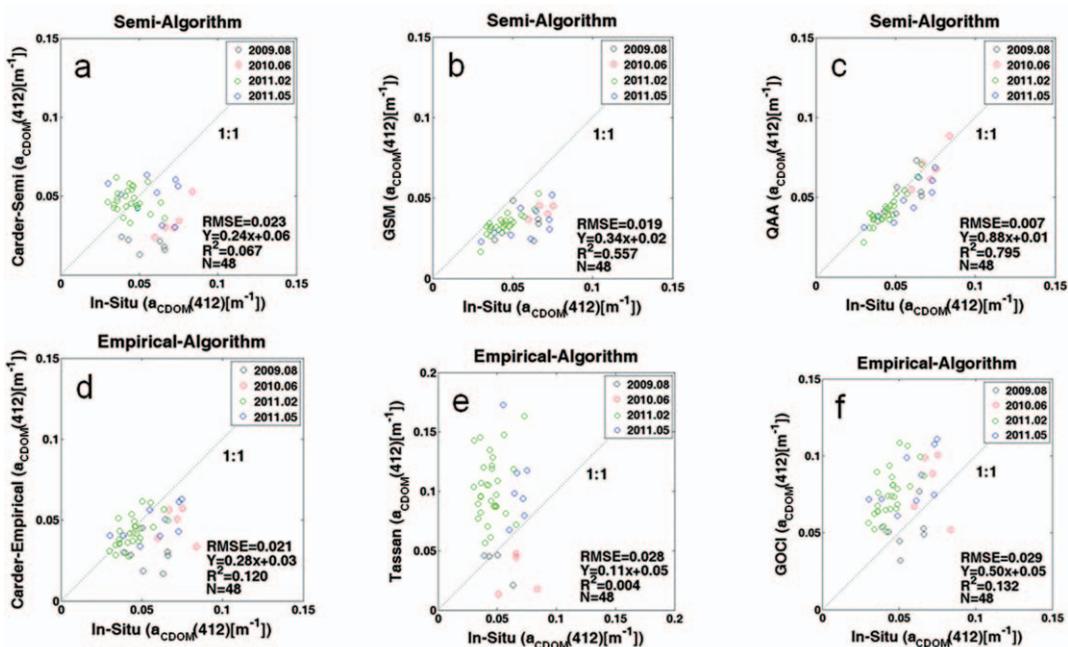


Fig. 2. The relationships between in-situ $a_{CDOM}(412)$ and CDOM algorithms. (a) Carder-Semi, (b) GSM, (c) QAA_v5, (d) Carder-Empirical, (e) Tassan, (f) GOCI.

Table 4. Summary of fitted equations and error statistics for the CDOM algorithms in the East Sea

Algorithms	Bias	RPD (%)	APD (%)	RMSE	R ²	N
Carder-semi	-0.009	-8.32	34.19	0.023	0.067	48
GSM	-0.016	-29.69	29.69	0.019	0.557	48
QAA_v5	-0.004	-7.22	10.83	0.007	0.795	48
Carder-emp	-0.018	-33.25	33.25	0.021	0.120	48
Tassan	0.009	26.34	274.89	0.028	0.004	48
GOCI	0.023	51.03	56.58	0.029	0.132	48

상관관계를 나타냈다($R^2=0.067$). RMSE는 0.023으로 다른 Semi-analytic Algorithms 결과와 비교 했을 때 가장 큰 오차를 보였다(Fig. 2a, Table 4). 위와 같은 결과는 Carder-semi 알고리즘이 현장에서 획득한 $a_{CDOM}(412)$ 와 큰 차이를 보이며 상호간의 관계가 적다는 것을 알 수 있다. $a_{CDOM}(412)$ 가 0.05 m^{-1} 미만의 경우 좋은 상관관계를 보였으나, 0.05 m^{-1} 이상의 값에서는 상대적으로 과소평가 되었다.

IOCCG (2006)의 연구 결과에 의하면 Carder-MODIS 알고리즘에서 추산된 $a_{dg}(443)$ 과 현장에서 획득한 $a_{dg}(443)$ 은 좋은 상관관계를 보였다($R^2=0.771$, RMSE=0.279, N=656). Carder-semi 알고리즘을 개발하기 위한 현장 자료들은 주로 열대와 아열대 해역에서 여름철에 획득한 자료들이다(Carder *et al.*, 2004).

일반적으로 CDOM은 태양광에 의해 광분해로 분해되는 것으로 알려져 있다(Hessen *et al.*, 1994; Morris and Hargreaves, 1997; Nelson *et al.*, 1998). 그러나 본 연구에 사용된 현장 데이터는 여름철 뿐 만 아니라 봄철, 겨울철 데이터가 포함되어 있다. 따라서 여름철 낮은 일차 생산력과 태양광의 증가가 Carder-semi 알고리즘에 영향을 주었고, 이러한 특성이 본 연구 해역에서 큰 오차를 보인 것으로 추정된다.

(2) Garver-Siegel-Maritorena Semi-Analytical Algorithm

GSM 알고리즘은 양의 상관관계를 나타내었다($R^2=0.557$). RMSE는 0.019로 다른 알고리즘과 비교 했을 때 두 번째로 큰 오차를 보였다(Fig. 2b, Table 4).

이와 같은 결과는 GSM 알고리즘이 현장에서 획득한 $a_{CDOM}(412)$ 와 좋은 상관관계를 보이는 것처럼 보이지만 전반적으로 현장 $a_{CDOM}(412)$ 값이 증가 할수록 GSM 알고리즘에서 추정된 $a_{CDOM}(412)$ 값이 과소평가 되어지는 경향을 보였다(Fig. 2b).

IOCCG (2006)의 연구 결과에 의하면 GSM 알고리즘에서 추산된 $a_{dg}(443)$ 과 현장에서 획득한 $a_{dg}(443)$ 은 좋은 상관관계를 보였다($R^2=0.798$, $RMSE=0.246$, $N=656$). GSM 알고리즘은 극지방을 제외한 전 지구해역 중 Case-1 Water에 적합하며, 다수 연구자들의 이용으로 MODIS Level 1에서 Level 2로 전환 될 때 위성 자료에 포함되어 제공되고 있다. 그러나 이 알고리즘은 동해와 같이 Case-1 Water에 최적화된 알고리즘에도 불구하고, 본 연구해역의 해역 특성 및 변화 그리고 계절 변동에 대한 검증이 부족하게 수행되어 왔다. GSM 알고리즘에 의한 CDOM 흡광도를 구하기 위해서는 계절과 지역에 따른 자료의 충분한 분석이 우선적으로 선행되어야 할 것이며, 충분한 검증을 통한 연구 해역에 맞는 알고리즘으로 보정해야 할 것이다.

(3) Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v5)

기존 CDOM 흡광도 산출 알고리즘 중 QAA_v5 알고리즘은 높은 양의 상관관계를 나타내었다($R^2=0.795$). $RMSE$ 는 0.007로 오차가 적었다(Fig. 2c, Table 4). Fig. 2(c)와 같이 현장관측 값과 알고리즘에서 추정된 값은 1:1 라인을 기준으로 다양한 범위에서 좋은 관계를 보여주고 있다. 위의 결과처럼 QAA_v5 알고리즘이 현장에서 획득한 $a_{CDOM}(412)$ 와 상관관계가 높으므로 가장 유사하게 추정하는 것으로 판단된다.

Lee *et al.* (2009)의 연구 결과에 의하면 QAA_v5 알고리즘에서 추산된 $a_{dg}(443)$ 과 현장에서 획득한 $a_{dg}(443)$ 은 좋은 결과를 보였다($R^2=0.820$, $RMS=0.296$, $N=751$). QAA_v5 알고리즘의 경우 다양한 범위의 해역에서 현장 $a_{CDOM}(412)$ 의 범위가 $0.01\sim 1\text{ m}^{-1}$ 를 이용하여 2009년 QAA_v5로 개선되었다. QAA_v5 알고리즘의 지속적인 검증과 개선은 동해 해역에서 가장 좋은 결과 값을 나타냈으며, 본 연구해역에 적합한 알고리즘이라 판단된다.

(4) Carder-empirical Algorithm

Carder-empirical 알고리즘은 양의 상관관계를 나

타냈다($R^2=0.120$). $RMSE$ 는 0.021였다(Fig. 2d, Table 4). Carder-empirical 방법이 1:1 라인에서 좋은 관계를 보여 주는 것으로 보이지만, Carder-semi 방법으로 계산된 결과처럼 0.05 m^{-1} 이상되는 범위에서는 상대적으로 낮은 상관관계를 나타내고 과소추정되는 경향을 보인다(Fig. 2d).

(5) Tassan's TSM Algorithm

Siswanto *et al.* (2011)의 연구 결과에 의하면 Tassan 알고리즘(Tang *et al.*, 2004)에서 추정된 ag_{440} 와 현장에서 획득한 ag_{440} 는 좋은 결과를 보였다($R^2=0.82$, $RMSE=0.186$, $N=247$). 그러나 본 연구에서는 CDOM 흡광도 산출 알고리즘 중 Tassan 알고리즘은 가장 미미한 상관관계를 보였으며($R^2=0.004$), $RMSE$ 는 0.028였다(Fig. 2e, Table 4). CDOM 흡광도 산출을 위한 Tassan 알고리즘은 현장에서 획득한 $a_{CDOM}(412)$ 와 관계가 적으며, 오차가 크고 각각의 $a_{CDOM}(412)$ 의 값이 일관성 있는 특성을 나타내지 않았다(Fig. 2e, Table 4).

서해와 동중국해처럼 Case-2 Water에 최적화된 Tassan 알고리즘의 경우, 본 연구 해역에 대한 광학적 특성에 대한 접근방식 차이로 인해 본 알고리즘의 신뢰도를 높이는데 무리가 있다. Tassan 알고리즘은 본 연구해역에서의 CDOM 흡광도 산출 알고리즘으로 적합하지 못하며, 지속적인 현장관측과 그에 맞는 검증이 수행되어야 할 것이다.

(6) Geostationary Ocean Color Imager CDOM Algorithm

문정언 외(2010)의 연구 결과에 의하면 GOCI의 CDOM 알고리즘에서 추정된 $a_{dom}(412)$ 와 현장에서 획득한 $a_{dom}(412)$ 를 분석한 결과 $RMSE=0.18$, $N=1348$ 이었다. GOCI의 CDOM 산출 알고리즘은 Empirical 방법으로 다른 알고리즘에 비해 한반도 주변 해역에 가장 적합하다. 또한 지속적인 현장 관측 자료 업데이트를 통하여 꾸준히 알고리즘의 개선 작업이 이루어지고 있어 한반도 주변해역을 가장 잘 분석 하고 있는 알고리즘이다. 그러나 본 연구에서는 기존 CDOM 흡광도 산출 알고리즘 중 GOCI 알고리즘은 낮은 상관관계를 나타냈으며($R^2=0.132$), $RMSE$ 는 0.029로 나타나 다른 알고리즘과 비교 했을 때 가장 높은 오차를 보였다. GOCI

의 CDOM 흡광도 산출 알고리즘은 현장 $a_{CDOM}(412)$ 와 관계가 미미하며, 오차가 가장 높았고, 자료 상호 간에 일관성 있는 특성을 나타내지 않았다. 전반적으로 GOCI의 CDOM 알고리즘에서 추정된 $a_{CDOM}(412)$ 값이 현장 $a_{CDOM}(412)$ 보다 과대평가 되어지는 경향을 보였다 (Fig 2f, Table 4).

GOCI 알고리즘은 한반도 주변에서의 다양한 현장 샘플을 이용하여 개발 되었으며 한반도 해역에 가장 최적화 된 것으로 판단된다. 그러나 문정언 외(2008)과 문정언 외(2010)의 연구 결과에 따르면 한반도의 현장 $a_{CDOM}(410)$, $a_{CDOM}(412)$ 가 $0.01\sim 5\text{ m}^{-1}$ 미만의 다양한 변화를 보여주지만 대부분의 관측 정점들이 서해 (Case-2 Water) 및 동중국해(Case-2 Water 혼합해역)에서 획득한 다수의 자료로 만들어진 알고리즘으로써 흡광도가 낮은 해역에 대한 검증이 부족하다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 CDOM 값이 0.1 m^{-1} 이하의 충분한 자료가 확보되어 검증 및 보정이 이루어지면 정확한 데이터 값을 추출 할 수 있을 것이라 기대된다.

2) MODIS 영상 이미지 적용 및 오차 분석

(1) CDOM 알고리즘의 동해 적용

앞의 결과를 종합하여 동해의 CDOM 순환을 조사하고 위성자료 활용을 위하여 6개의 알고리즘을 MODIS 해상위성 영상에 적용하여 검토하였다. 사용된 위성 이미지는 2011년 5월 17일 04시 35분 00초(GMT)에 관측한 자료이다(Fig. 3).

6개의 CDOM 알고리즘으로 추출한 $a_{CDOM}(412)$ 의 분포 패턴은 연구 해역의 연안 해역, 포항과 울산 부근 및 연구 해역에서의 북동 해역에서 상대적으로 높게 나타난다. 6개의 CDOM 알고리즘의 표층 $a_{CDOM}(412)$ 분포는 상대적으로 유사하게 추정되나 위치별로 다른 흡광도 값을 나타내었다. 그러나 Carder-semi 및 GSM 알고리즘에서 추출된 값은 연안의 높은 흡광도 값을 보여주지 않고, Empirical-Algorithms의 결과는 상대적으로 높게 관측되었다. 이런 결과는 앞에서 언급 하였듯이 Semi-analytic Algorithms는 알고리즘 개발 시 적용한 자료의 제한된 범위 때문에 본 연구에서 상대적으로

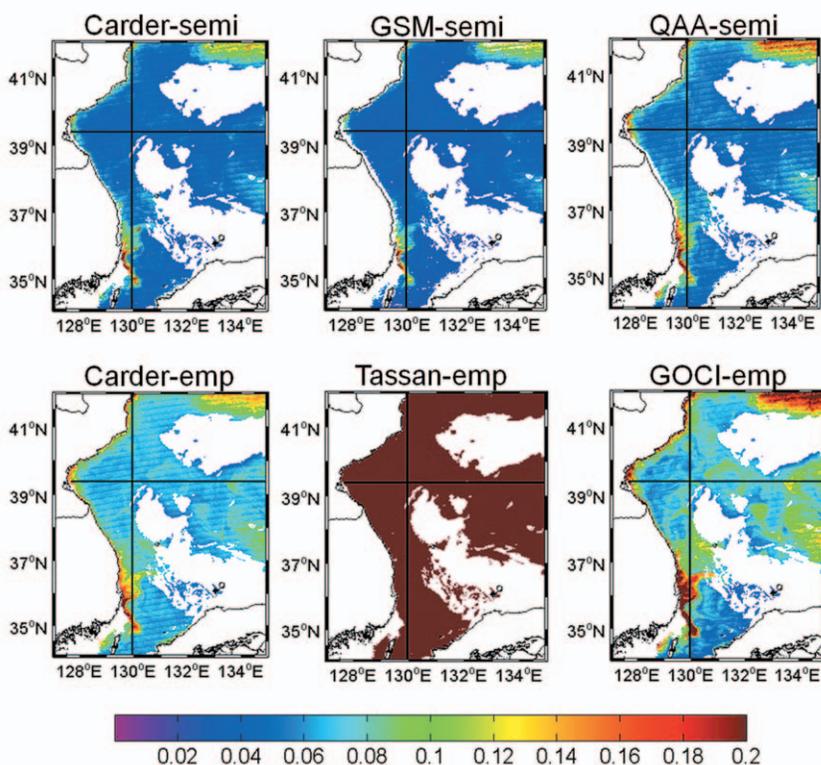


Fig. 3. $a_{CDOM}(412)$ concentrations retrieved from MODIS images using CDOM algorithms (Semi-Algorithms and Empirical-Algorithms).

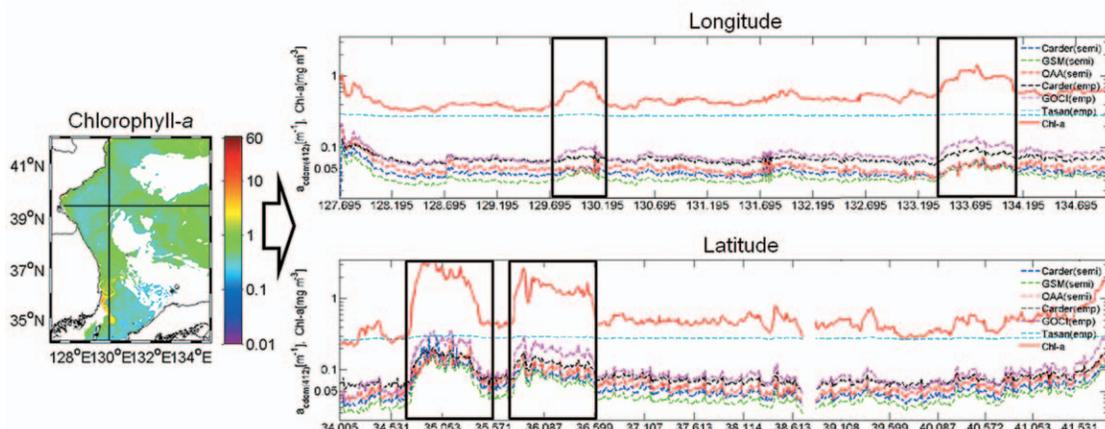


Fig. 4. Comparison of distribution pattern between chlorophyll-a and $a_{CDOM(412)}$. Upper: Longitude line, Lower: Latitude line.

과소추정되는 결과를 보이는 것으로 판단된다. 그러나 Empirical-Algorithms의 경우 상대적으로 과대추정되지만 연안 근처에 높은 값을 잘 반영하고 있다.

(2) CDOM 알고리즘 검증과 엽록소- α 와의 관계

$a_{CDOM(412)}$ 의 변화와 알고리즘 간 공간에 따른 차이를 분석하고자 연속된 데이터가 확보되어 있는 두 개의 라인(동-서 라인, 남-북 라인)을 선택하였다(Fig. 3). Fig. 4는 각각의 라인에서 $a_{CDOM(412)}$ 값을 상대적으로 비교한 그래프이다. 6개의 CDOM 알고리즘 중 가장 유사하게 추정하였던 QAA_v5 알고리즘을 기준으로 비교했을 때 GSM 알고리즘이 가장 과소추정하는 경향을 보였으며, 그 다음으로 Carder-semi가 과소추정하는 것으로 나타났다. 그리고 Carder-empirical, GOCI, Tassan의 순서로 과대추정하는 경향을 보였다. Tassan 알고리즘을 제외한 총 5개의 알고리즘을 통해 추출한 $a_{CDOM(412)}$ 는 전체적으로 유사한 패턴을 나타냈다. Tassan 알고리즘의 경우 다양한 CDOM의 변화에도 불구하고 일정하게 과대추정되었다(Fig. 4).

$a_{CDOM(412)}$ 에 대한 엽록소- α 의 영향을 알아보기와 연구에서 사용된 총 6개의 CDOM 알고리즘을 엽록소- α 의 대조군으로 선정하고, 동일한 시간대의 MODIS 위성 엽록소- α 이미지를 사용하였다. 엽록소- α 는 $a_{CDOM(412)}$ 와 동일한 라인에서 추출하여 비교 및 분석하였다(Fig. 4).

엽록소-a 농도 패턴은 남-북 방향의 경우 2개의 지점(34.70°N~35.57°N와 35.70°N~36.59°N)에서

상대적으로 높은 엽록소- α 값을 보였으며, 또한 동-서 방향의 경우 2개의 지점(129.70°N~130.19°N와 133.35°N~134.19°N)에서 상대적으로 높은 엽록소- α 값을 보인다. 6개의 알고리즘을 통해 추산된 $a_{CDOM(412)}$ 와 비교해 본 결과, 엽록소- α 는 $a_{CDOM(412)}$ 와 전체적으로 유사한 패턴을 나타냈으며, 엽록소- α 와 동일한 지점에서 $a_{CDOM(412)}$ 값도 높게 나타났다.

홍기훈 외(2011)은 동해 남서부 해역의 CDOM index 값이 춘계 식물플랑크톤 번성기(spring bloom)를 포함하여 엽록소- α 의 농도가 높을 때에 CDOM index 값도 높은 경향을 나타냈다. 2007년 4월에는 CDOM index 값이 6.338인 곳도 있음을 보고하였는데 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 이러한 결과는 $a_{CDOM(412)}$ 와 엽록소- α 의 상호관계에서 크게 두 가지의 가능성을 제시한다. 첫째, 엽록소- α 와 $a_{CDOM(412)}$ 의 전체적인 패턴이 유사하게 나타남으로 엽록소- α 농도가 높은 해역에서 해석의성을 통한 엽록소- α 측정 시 $a_{CDOM(412)}$ 의 영향이 있을 가능성을 제시한다. 두 번째로 Case -1 Water의 특징을 보이는 동해에서의 $a_{CDOM(412)}$ 는 박테리아에 의한 식물플랑크톤의 분해로 현장에서 생산될 가능성이 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 CDOM과 엽록소- α 를 단순 비교하였으므로 여러 가지 현상들을 복합적으로 설명하기에는 한계점들이 많기 때문에 향후 다른 세부적인 요인들과의 비교와 분석이 수행되어야 할 것이다.

(3) CDOM 알고리즘 간의 오차 검증

$a_{CDOM(412)}$ 의 총 6개의 알고리즘에 대한 공간적 편차

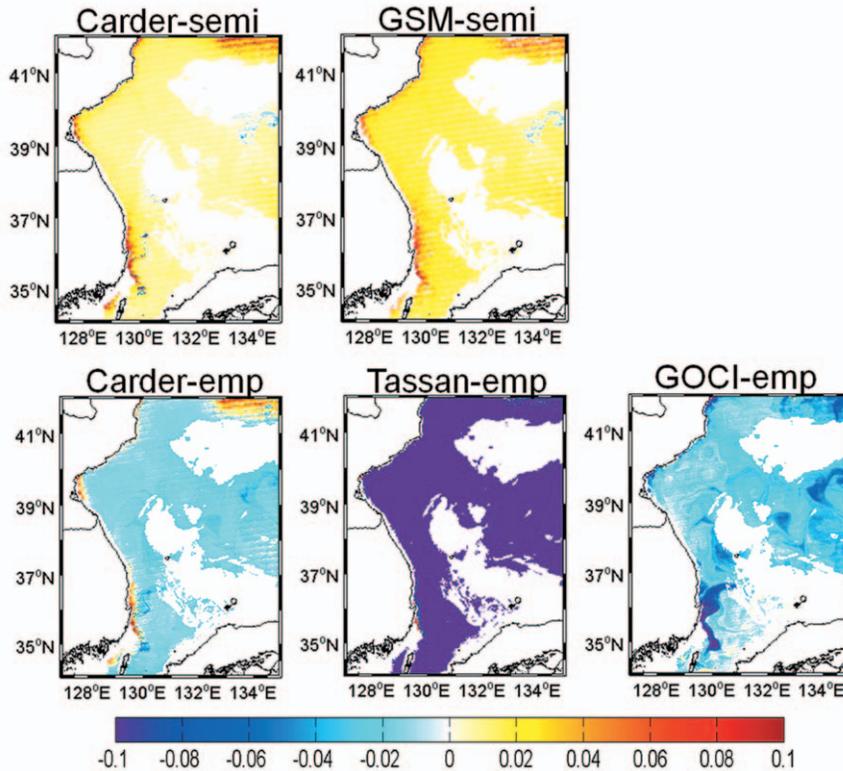


Fig. 5. Differences between CDOM algorithms based on QAA_v5: Each panel indicates that QAA_v5 minus other CDOM algorithms (Carder-Semi, GSM, Carder-Empirical, Tassan, GOCI).

를 세부적으로 분석하고자 현장 값과 가장 유사하게 추정된 QAA_v5 알고리즘을 기준으로 다른 알고리즘의 차이를 계산하여 표층 분포를 나타내었다(Fig. 5). 편차는 각각 QAA_v5-Carder-semi, QAA_v5-GSM, QAA_v5-Carder-empirical, QAA_v5-Tassan, QAA_v5-GOCI의 방법으로 계산하였다(각항에서 '-'는 minus 기호임). Semi-analytic Algorithms 중 Carder-Semi와 GSM 알고리즘의 경우 QAA_v5 알고리즘과 비교했을 때 평균 약 0.05 m^{-1} 의 낮았고, 특히 연구 해역의 북동 해역(41°N~42°N와 132°E~135°E)에서 최대 0.1 m^{-1} 로 과소 추정 되었다(Fig. 5). 또한 포항부근과 동한만 부근에서도 약 0.1 m^{-1} 의 값으로 과소 추정 되었지만, 41°N~42°N와 132°E~135°E에서 고리 형태를 보이며 과대추정하는 경향을 보였다.

Empirical-Algorithms 중 Carder-empirical과 GOCI 알고리즘의 경우 QAA_v5 알고리즘과 비교했을 때 평균 약 0.03 m^{-1} 의 과대추정하는 경향을 보였다. Carder-empirical 알고리즘은 다른 해역과 달리

CDOM의 값이 높은 해역(동한만, 포항, 41°N~42°N와 132°E~135°E)에서 과소추정하는 경향을 보였다. Tassan의 경우 본 연구에서 검증된 다른 알고리즘과의 흡광도 차이가 크게 나타났으며, 전체적으로 0.1 m^{-1} 이상의 과대추정하는 경향을 보였다. GOCI 알고리즘의 경우 포항 부근 해역에서 약 0.1 m^{-1} 이상의 과대추정하는 경향을 보였다(Fig. 5).

전체적으로 이전 결과에서 상관관계가 좋았던 QAA_v5 알고리즘에 비해 Semi-analytic Algorithms은 상대적으로 과소추정되는 경향을 보였고, Empirical-Algorithms은 과대추정하는 경향을 보였다. 이러한 차이는 첫 번째로 각각의 알고리즘이 서로 다른 특성을 가지고 있기 때문인 것으로, 알고리즘 개발에 사용된 자료들이 전 지구적 또는 지역적 제한을 가지고 개발되었기 때문에 각기 다른 특성을 내재할 수 있다는 것이다. 결론적으로 가장 상관관계가 높았던 QAA_v5 알고리즘을 기준으로 전체해역에 대한 각 알고리즘 흡광도 차이는 과소에서 과대추정 순으로 GSM,

Carder-semi, Carder-empirical, GOCI, Tassan으로 나타났다. 본 연구에서는 시/공간적으로 다양한 현장 샘플을 이용하여 CDOM 알고리즘을 검증하였으며, 그 중 QAA_v5 알고리즘이 본 연구에 가장 유사하게 추정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 해양 광 특성 현장자료를 이용하고, CDOM의 특성과 해수환경을 고려하여 다양한 CDOM 알고리즘(Carder-semi, GSM, QAA_v5, Carder-empirical, Tassan, GOCI)을 검증 및 평가하였다.

현장자료와 CDOM 알고리즘을 이용하여 추산한 $a_{CDOM}(412)$ 의 상관관계를 살펴보고 MODIS 위성 이미지에 적용시켜본 결과 QAA_v5 알고리즘이 연구해역에서 가장 적합하였다. 각각의 알고리즘에서 추출한 $a_{CDOM}(412)$ 분포는 전체적으로 유사하나 상대적으로 다른 위상 값이 나타났다. 그리고 엽록소- α 와 $a_{CDOM}(412)$ 의 분포 패턴은 유사하게 나타나 해색위성을 이용하여 엽록소- α 를 측정할 때 $a_{CDOM}(412)$ 의 영향이 있을 가능성을 제시하였다.

해색위성의 원격탐사반사도를 이용한 CDOM 알고리즘 검증은 해역에 따른 광학 특성 차이로 인하여 해역에 따라 영향을 받을 수 있다. 또한 CDOM 알고리즘들은 전 지구 및 지역적 특성을 가지고 개발하였기 때문에 각기 다른 특성을 내재하고 있음을 의미한다. 따라서 이러한 차이로 알고리즘에서 획득한 값은 현장 관측 값과 차이를 가지게 된다. 위와 같은 문제점을 보완하기 위해서는 정확한 해수 중 물질의 광학적 특성을 규명, 정밀한 지역적 알고리즘 개발, 그리고 다양한 해역에서의 지속적인 현장 관측 자료 확보를 통한 알고리즘의 개선 작업이 이루어져야 할 것이다. 동해와 같이 Case-1 Water의 경우 식물플랑크톤 생물량과 해색(ocean color) 관측을 통해 Empirical-Algorithms을 보다 쉽게 개선할 수 있는 것으로 보고되었다(Morel, 1988; Morel and Maritorena, 2001; O'Reilly *et al.*, 1998). 한반도에 맞춰진 GOCI의 CDOM 알고리즘은 대표적인 Empirical-Algorithm으로써, 다른 알고리즘보다 쉽게 동해의 광학적 특성을 잘 반영할 수 있을 거라 판단된다.

본 연구에서 검증된 총 6개의 알고리즘 중 QAA_v5 알고리즘이 현장 측정된 값과 유사한 CDOM 흡광도를 추정할 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나 위성 자료와의 비교에 사용된 현장 CDOM 자료는 시간과 공간에 대해 어느 정도 제한이 있었으며, CDOM 알고리즘들의 단순 비교를 통한 검증이 수행되었다. 그러므로 관측치 비교를 위한 현장 관측의 시공간 확대와 생물-광학 특성을 고려한 추가적인 연구가 향후 수행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업인 “정지궤도 해양위성(GOCI) 활용연구지원 사업”의 도움으로 부경대학교 해양과학공동연구소에 의하여 수행되었습니다. 또한 극지연구소의 “극지위성활용”사업의 지원으로 위성자료를 처리, 활용할 수 있었습니다. 위성자료의 원시자료를 제공해준 NASA에 감사하며, 논문 심사 및 교정이 도움을 주신 심사위원님들께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- 문정언, 유주형, 안유환, 민지은, 최중기, 2008. 한반도 주변 해역에서 용존유기물의 흡광계수(a_{dom}) 연구, 한국해양학회추계포스터발표.
- 문정언, 안유환, 유주형, P. Shanmugam, 2010. 정지궤도 해색탐재체(GOCI) 해수환경분석 알고리즘 개발, 대한원격탐사학회지, 26(2): 189-207.
- 홍기훈, 안유환, 손영백, 유주형, 김창준, 양동범, 김영일, 저장수, 2011. MODIS를 이용한 춘·하계 동해 서남부 해역의 해수 중 입자성 유기탄소 함량 추정 알고리즘 개선, 대한원격탐사학회지, 27(2): 107-120.
- Ahn, Y.H., P. Shanmugam, J.E. Moon, and J.H. Ryu, 2008. Satellite remote sensing of a low-salinity water plume in the East China Sea, *Annales Geophysicae*, 26: 2019-2035.
- Biddanda, B. and R. Benner, 1997. Carbon, nitrogen,

- and carbohydrate fluxed during the production of particulate and dissolved organic matter by marine phytoplankton, *Limnology and Oceanography*, 42(3): 506-518.
- Blough, N.V. and R.D. Vecchio, 2002. *Chromophoric DOM in the Coastal Environment*, In "Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter" (D. A. Hansell and C. A. Carlson, Eds.), Academic Press, San Diego.
- 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*, 104(C3): 20599-20611.
- 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.
- Carder, K.L., F.R. Chen, Z.P. Lee, S.K. Hawes, and D. Kamykowski, 1999. Semianalytic Moderate Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio optical domains based on nitrate-depletion temperatures, *Journal of Geophysical Research*, 104(C3): 5403-5421.
- Garver, S.A. and D.A. Siegel, 1997. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation 1. Times series from the Sargasso Sea, *Journal of Geophysical Research*, 102(C8): 18607-18625.
- 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.
- Gibson, J.A.E., W.F. Vincent, B. Nieke, and R. Pienitz, 2000. Control of biological exposure to UV radiation in the Arctic Ocean: Comparison of the roles of ozone and riverine dissolved organic matter, *Arctic*, 53(4): 372-382.
- Hessen, D.O., K. Nygaard, K. Salonen, and A. Vähätalo, 1994. The effect of substrate stoichiometry of microbial activity and carbon degradation in humic lakes, *Environment International*, 20(1): 67-76.
- Hochman, H., J.J. Walsh, K.L. Carder, A. Sournia, and F.E. M?ller-Karger, 1995. Analysis of ocean color components within stratified and well-mixed waters of the western English channel, *Journal of Geophysical Research*, 100(C6): 10777-10787.
- Hoge, F.E., M.E. Williams, P.E. Lyon, R.N. Swift, and J.K. Yungel, 1999. Satellite retrieval of inherent optical properties by inversion of an oceanic radiance model: A preliminary algorithm, *Applied optics*, 38(3): 495-504.
- IOCCG, 2006. Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications, *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group*, 5: 7-103.
- Kahru, M. and B.G. Mitchell, 2001. Seasonal and nonseasonal variability of satellite-derived chlorophyll and dissolved organic matter concentration in the California Current, *Journal of Geophysical Research*, 106(C2): 2517-2529.
- 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.
- Lee, Z.P., L. Bertrand, W. Jeremy, and A. Robert, 2009. *An Update of the Quasi-Analytical*

- Algorithm(QAA_v5).*
- Mannino, A., M.E. Russ, and S.B. Hooker, 2008. Algorithm development and validation for satellite-derived distributions of DOC and CDOM in the U.S. Middle Atlantic Bight, *Journal of Geophysical Research*, 113, C07051, doi:10.1029/JC004493.
- 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.
- McAllister, C.D., T.R. Parsons, K. Stephens, and J.D.H. Strickland, 1961. Measurements of primary production in coastal sea water using a large-volume plastic sphere, *Limnology and Oceanography*, 6(3): 237-258.
- McClain, C.R., G.C. Feldman, and S.B. Hooker, 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series, *Deep-sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 51(1-3):5-42.
- Mitchell, B.G., A. Bricaud, K. Carder, J. Cleveland, G. Ferrari, R. Gould, M. Kahru, M. Kishino, H. Maske, T. Moisan, L. Moore, N. Nelson, D. Phinney, R. Reynolds, H. Sosik, D. Stramski, S. Tassan, C. Trees, A. Weidemann, J. Wieland, and A. Vodacek, 2000. *Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples*, In : Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, revision2. Ed. By G.S. Fargion and J.L. Mueller, NASA · TM-2000-209966.
- Morel, A., 1988. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter contents (Case I Waters), *Journal of Geophysical Research*, 93(C9): 10749-10768.
- Morel, A. and L. Prieur, 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22(4): 709-722.
- Morel, A. and S. Maritorena, 2001. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal, *Journal of Geophysical Research*, 106(C4): 7163-7180.
- Moran, M.A., W.M. Sheldon, and R.G. Zepp, 2000. Carbon loss and optical property changes during long-term photochemical and biological degradation of estuarine dissolved organic matter, *Limnology and Oceanography*, 45(6): 1254-1264.
- Morris, D.P. and B.R. Hargreaves, 1997. The role of photochemical degradation of dissolved organic carbon in regulation the UV transparency of three lakes on the Pocono Plateau, *Limnology and Oceanography*, 42(2): 239-249.
- Nelson, N.B., D.A. Siegel, and A.F. Michaels, 1998. Seasonal dynamics of colored dissolved material in the Sargasso Sea, *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(6): 931-957.
- Nelson, N.B. and D.A. Siegel, 2002. *Chromophoric DOM in the Open Ocean*. In "Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter" (D.A. Hansell and C.A. Carlson, Eds.), Academic Press, San Diego.
- O' Reilly, J.E., S. Maritorena, B.G. Mitchell, D.A. Siegel, K.L. Carder, S.A. Gaver, M. Kahru, and C. McClain, 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103(C11): 24937-24953.
- Robert, R.B., E.O. Michael, and M.B. James, 1993. Influences of the Orinoco River outflow on distributions of algal pigments in the Caribbean Sea, *Journal of Geophysical Research*, 98(C2): 2259-2269.
- Siswanto, E., J. Tang, H. Yanaguchi, Y.H. Ahn, J. Ishizaka, S.J. Shin, S.W. Kim, Y. Kiyomoto, K. Yamada, C. Chiang, and H. Kawamura, 2011.

- Empirical ocean-color algorithms to retrieve chlorophyll-a, total suspended matter, and colored dissolved organic matter absorption coefficient in the Yellow and East China Seas, *Journal of Oceanography*, 67(5): 627-650.
- Son, Y.B., W.D. Gardner, A.V. Mishonov, and M.J. Richardson, 2009. Multispectral remote-sensing algorithms for particulate organic carbon (POC): The Gulf Mexico, *Remote sensing of Environment*, 113(1): 50-61.
- Tang, J., X. Wang, Q. Song, T. Li, J. Chen, H. Huang, and J. Ren, 2004. The statistical inversion algorithms of water constituents for the Huanghai Sea and the East China Sea, *Acta Oceanologica Sinica*, 23(4): 617-626.
- Urban-Rich, J., 1999. Release of dissolved organic carbon from copepod fecal pellets in the Greenland Sea, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 232(1): 107-124.
- Williamson, C.E., R.S. Stemberger, D.P. Morris, T.M. Frost, and S.G. Paulsen, 1996. Ultraviolet radiation in North American lakes: Attenuation estimates from DOC measurements and implications for plankton communities, *Limnology and Oceanography*, 41(5): 1024-1034.
- Yoo, S.J., H.C. Kim, J.A. Lee, and M.O. Park, 2002. Validation of chlorophyll algorithm in Ulleung Basin, East/Japan Sea, *Remote sensing of Environment*, 18(1): 35-42.
- Zanardi-Lamardo, E., C.D. Clark, C.A. Moore, and R.G. Zika, 2002. Comparison of the molecular mass and optical properties of colored dissolved organic material on two rivers and coastal waters by flow field-flow fractionation, *Environmental Science and Technology*, 36(13): 2806-2814.