

## 2017년 통영 해역에서의 *Alexandrium affine* 우점 해수의 흡광 특성 Analysis on the Optical Absorption Property of Sea Waters Dominated by *Alexandrium affine* in Coastal Waters off Tongyeong, 2017

김원국<sup>1)</sup> · 한태현<sup>2)</sup> · 정승원<sup>3)</sup> · 강돈혁<sup>4)</sup>

Wonkook Kim · Tai-Hyun Han · Seung Won Jung · Donhyug Kang

### Abstract

Red tide has caused massive fish kills in Korean coastal waters with devastating economic loss in the aquaculture industry since 1995. Remote sensing technique has shown to be effective for the detection of red tide in wide areas, where the absorption property of red tide water plays a central role in understanding the red tide reflectance. This study analyzed the optical absorption property of sea waters dominated by the dinoflagellate specie of *Alexandrium affine*, off the Tongyeong area in August, 2017. Water samples collected from 20 stations in the ship-based campaign were measured for absorption by pigment, suspended solid, and dissolved organic matter, with the corresponding water quality variables such as chlorophyll concentration and total suspended solid. The analysis showed that *Alexandrium*-dominated water exhibits strong absorption in the spectral range below 400 nm unlike that of diatom-dominated waters, and greater fluctuations in the range of 400 nm - 500 nm. The packaging effect in pigment absorption was stronger in *Alexandrium*-dominated waters, and the exponent in the absorption by detritus and gelbstoff is disparate for diatom and *Alexandrium*. In the model for the detritus and gelbstoff absorption ( $a_{dg}(\lambda) = a_{dg}(\lambda_0)e^{-s(\lambda-\lambda_0)}$ ), the optimal exponent coefficient(s) for the *Alexandrium* was close to 0.01 rather than to 0.015, which was commonly use for modelling diatom waters.

Keywords : Pigment Absorption, *Alexandrium affine*, Red Tide, Hyperspectral

### 초 록

적조는 연안 해역에서 양식어류를 폐사 시키는 등 많은 경제적 피해를 입혀왔다. 이러한 적조의 광역 분포를 효과적으로 파악하기 위하여 원격탐사가 활용되어 왔는데, 적조 해수가 가지는 흡광 특성은 원격탐사에 중요한 요소인 해수반사도를 이해함에 있어서 핵심적인 역할을 한다. 본 연구에서는 2017년 8월 통영 인근 해역에서 출현한 *Alexandrium affine* 종이 우점한 해수에 대한 흡광 특성을 분석하였다. 선박 관측을 통하여 총 20개 정점에서 획득한 시료에서 색소 흡광, 부유물 흡광, 용존유기물 흡광을 측정하였고, 이를 수질 변수인 염분소 농도, 부유물 농도와 관련하여 분석하였다. 분석 결과, 규조류 우점 해수와는 다르게 *Alexandrium* 우점 시료는 400 nm 이하에서 강한 흡광을 나타내었고, 또한 400 nm - 500 nm 에서 굴곡이 크게 나타남을 확인하였다. 색소 흡광의 집적 효과 또한 규조류와 다르게 나타남을 확인하였고, 부유물 및 용존유기물 흡광 모델 ( $a_{dg}(\lambda) = a_{dg}(\lambda_0)e^{-s(\lambda-\lambda_0)}$ )에서의 지수부 계수(s) 역시 기존 규조류에서 일반적으로 사용하는 0.015와는 달리 0.01이 더 적합함을 보였다.

핵심어 : 색소 흡광, *Alexandrium affine*, 적조, 초분광

Received 2019. 12. 16, Revised 2019. 12. 20, Accepted 2019. 12. 23

1) Member, Dept. Civil and Environmental Engineering, Pusan National University (E-mail: )

2) Korea Ocean Satellite Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, (E-mail: thhan@kiost.ac.kr)

3) South Sea Research Institute, Korea Institute of Ocean Science and Technology, (E-mail: diatom@kiost.ac.kr)

4) Corresponding author, Maritime Security Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology (E-mail: dhkang@kiost.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

우리나라 남해안은 적조(赤潮)로 인한 피해가 빈발하는 해역으로 통상 7~8월 여름철 여수 남단에서 발생이 시작되어 해류를 따라 동쪽으로 확산하는 경향이 있으며 늦게는 9월 말까지도 그 피해가 이어지기도 한다(Lee *et al.*, 2013). 1995년 대규모 적조가 발생한 이래로 규모의 차이는 있지만, 거의 해마다 적조가 발생하였으며 그 피해액은 1995년에 약 710억 원, 2003년에 약 22억 원, 2007년에 약 12억 원 등에 이른다(Park *et al.*, 2013). 국립수산과학원에서는 적조의 피해를 최소화하기 위하여 적조 발생 시기에 선박을 이용하여 예찰을 수행하고 있지만, 선박 관측이 가능한 해역의 범위에 한계가 있기 때문에 적조의 전체적인 범위를 관측하기에는 무리가 있다. 이에 인공위성 및 항공기를 이용한 원격탐사 기법이 현장 관측과 함께 사용될 경우, 적조 탐지 범위를 넓혀주고 조기 탐지 시 양식 어민이 적조에 대한 대비를 할 수 있는 시간을 확보할 수 있다는 장점이 있다(Nakanishi *et al.*, 1996; He *et al.*, 2005; Ahn and Shanmugam, 2006).

적조가 가지는 고유한 적색의 색깔은 식물성 플랑크톤의 산란에 의한 영향도 있지만, 플랑크톤내 색소들의 흡광 특성에 기인한 부분이 크다(Dierssen *et al.*, 2006). 플랑크톤의 흡광에 대한 연구는 과거로부터 많은 연구가 되어 왔지만(Morel and Bricaud, 1981; Roesler *et al.*, 1989; Babin *et al.*, 1993; Lee and Carder, 2004; Devred *et al.*, 2006.), 그 중에서도 적조 생물이 속하는 와편모조류(dinoflagellates)의 흡광에 대한 연구는 Carder and Steward (1985), Millie *et al.* (1997), Kahru and Mitchell (1998) 등에서 이루어졌다. 와편모조류 중 *Alexandrium* 종에 대한 광학적 연구도 소수 수행되었는데, Leong and Taguchi (2006)는 배양 실험을 통해 다양한 영양 조건에 따른 *Alexandrium tamarense* 종의 흡광에 대한 연구를 수행하여 다른 규조류와 혼합된 가운데서도 *Alexandrium* 종의 유무를 탐지해낼 수 있는 가능성을 보여주었고, Carreto *et al.* (1989)는 *Alexandrium excavatum* 종이 강한 자외선 흡광을 일으킴을 보였다.

본 연구에서는 우리나라 남해 통영 인근해역에서 획득한 *Alexandrium affine* 종에 대한 흡광 특성을 분석하였다. 대부분의 *Alexandrium* 종은 굴, 홍합, 조개 등에 축적되어 섭취한 사람에게 마비를 일으키는 PSP (Paralytic Shellfish Poisoning)를 유발하며(Hallegraeph, 1993), 1986년 부산 및 진해 마산만에 발생한 이후, 남해에 지속적으로 출현하고 있다(Kim *et al.*, 2017). 하지만, 우리나라 주변 해수에 발생하는 적조 해수에 대하여 색소, 부유물, 유기물에 대한 흡광 특

성을 측정하여 발표한 사례는 아직까지 많지 않다. 본 연구는 2017년 8월 11일에 선박관측을 수행하여 색소 흡광, 총부유물 흡광, 그리고 용존 유기물 흡광을 측정하여 분석한 Kim *et al.* (2018)의 후속 연구로서, 규조류와 적조 해수의 구분 없이 수행하였던 기존 연구와는 달리, 본 연구에서는 적조 우점 시료와 규조류 우점 시료를 구분하여 흡광 스펙트럼의 차이를 보다 자세히 분석하고, 흡광 계수의 집적효과(packaging effect) 등 수질변수와의 관계를 추가로 분석하였다.

## 2. 현장자료 및 방법

### 2.1 실험해역

현장 자료의 취득은 통영 서안(西岸)의 약 25 km × 25 km 해역에서 선박(어선)을 이용하여 2017년 8월 11일 하루 동안 수행되었다. Fig. 1에 해당 해역에서 소화한 총 37개 정점의 위치를 바닥 수심 자료와 함께 도시하였다. 전체 정점 가운데 20개의 정점에서만 광학 변수 관측을 위한 채수(採水)를 시행하였고(Fig. 1에서 적색 원으로 표시됨. 이후 “광학 정점”이라 일컬음), 이 20개의 광학 정점에서는 수온, 염분, 엽록소 농도, 총부유물 농도, 색소흡광, 부유물흡광, 용존유기물 흡광, 그리고 생물종 구성을 측정하였다. 고농도의 적조(엽록소 농도 10 mg/m<sup>3</sup> 이상)를 조우한 2개의 정점(H0, D0)은 지도상에 별표로 표시하였다.

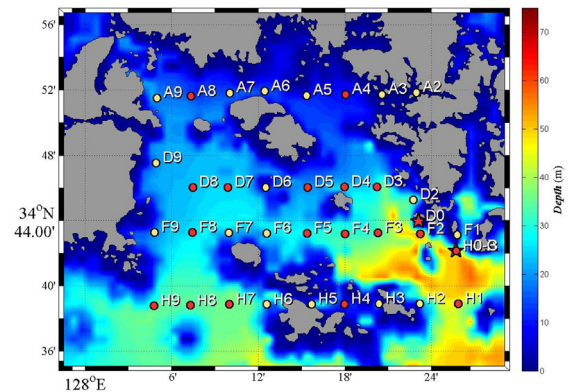


Fig. 1. A map of study area near Tongyeong with the stations visited presented in circles. Red circles are "optical stations", where the absorption coefficients and the water quality variables were measured. Star marks are the stations where intense *Alexandrium* bloom was encountered

### 2.2 해수광학자료

각 광학 정점에서 채수한 시료로부터 측정된 변수 및 측정 방

법은 아래와 같다. 엽록소 농도는 47 mm GF/F (Glass Microfiber Filter)를 통하여 해수를 여과한 후 90% 아세톤으로 색소를 추출하고 Perkin-Elmer Lambda-19를 이용하여 측정하였다 (Jeffrey and Humphrey, 1975). 총부유물 농도는 polycarbonate membrane filter(47 mm)의 무게를 미리 측정해 놓고, 해수를 여과한 후 냉동 보관하여 실험실에서 측정된다. 해동 후 60°C 오븐에 4시간 건조 한 후 건조량을 측정하였다. 색소 및 총부유물 흡광은 filter-pad 방법(Kishino *et al.*, 1985)을 사용하였다. 해수에서 채수한 시료를 Whatmann GF/F filter(25 mm)에 여과한 후 분광광도계(Cary-100 UV/VIS spectrophotometer)를 사용하여 총부유물 흡광을 측정하고, 측정이 끝난 필터의 색소를 제거한 후 잔존해 있는 부유물의 흡광을 측정한다. 용존유기물 흡광은 membrane syringe filter(25 mm)를 사용하여 측정하였다.

적조 생물량을 분석하기 위한 식물플랑크톤의 분석은 채집 정점의 표층(0.5 m)에서 Niskin 채수기를 이용하여 1 L를 채수한 다음 선상에서 Lugol 고정액으로 고정 (최종 농도 2%)한 후 실험실로 운반하였다. 시료는 24시간이상 침전시킨 후 상등액을 제거 후 200 mL로 농축하였다. 정량분석은 농축된 시료를 균일하게 섞은 후 1 mL을 취하여 Sedwick-Rafter counting chamber에 넣고 광학현미경(Zeiss Axioskop 40)×400배하에서 3회 계수한 후 현존량으로 환산하였다. 정성분석은 농축된 시료 적당량을 슬라이드 글라스 위에 놓고 400~1000 배하에서 동정하였으며, 광학현미경으로 동정이 어려운 종들은 주사전자현미경(Jeol, 7600 F)으로 동정하였다.

### 2.3 흡광에 대한 광학적 모델링

흡광계수는 엽록소 농도 또는 생물량이 증가함에 따라 증가하지만, 단위 엽록소 농도당 흡광, 즉 특정 흡광계수(specific absorption coefficient,  $a_{ph}^*$ )는 엽록소 농도가 증가함에 따라 작아지는 집적효과가 일어나게 된다. 기존 연구에 따라(Bricaud *et al.*, 1995), 특정 흡광계수( $a_{ph}^*$ )와 엽록소 농도( $C$ , 단위:  $mg/m^3$ )를 아래와 같이 모델링할 수 있는데,

$$a_{ph}^*(\lambda) = A(\lambda) C^{-B(\lambda)} \quad (1)$$

, where  $a_{ph}^*(\lambda)$  represents specific absorption coefficient for wavelength  $\lambda$ , and  $A(\lambda)$  and  $B(\lambda)$  are the model coefficients.

이 때  $\lambda$ 는 파장(nm),  $A(\lambda)$  및  $B(\lambda)$ 는 모델의 계수이다. 부유물과 용존유기물의 흡광계수는 지수함수를 이용하여 개별적으로 모델링되기도 하지만, 두 흡광계수 모두 지수함수 기반으

로 되어 있다는 점, 개별적인 측정값이 없는 경우 두 흡광의 분리가 어렵다는 점으로 인하여 두 흡광계수를 아래와 같이 통합하여 나타내기도 한다.

$$a_{dg}(\lambda) = a_{dg}(\lambda_0)e^{-s(\lambda-\lambda_0)} \quad (2)$$

, where  $a_{dg}(\lambda)$  denotes the absorption by detritus and gelbstoff for wavelength  $\lambda$ ,  $s$  is the exponent coefficient, and  $\lambda_0$  is the reference wavelength, which was set as 440 nm in this study.

본 연구에서는 두 흡광계수를 합하여 Eq. (2)와 같이 하나의 식으로 나타내었다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 색소 흡광

전체 시료를 *Alexandrium* 우점 해수와 구조류 우점 해수로 구분하여 분석하기 위하여, 총 생물량 중 *Alexandrium* 생물량이 거의 없다고 간주할 수 있는 1% 미만인 시료를 구조류 우점 해수로 분류하였고, *Alexandrium* 생물량이 전체 생물량의 75% 이상인 시료를 *Alexandrium* 우점 해수로 분류하였다. 구조류 우점 시료의 엽록소 농도 범위는 약  $1 mg/m^3$  또는 그 이하였고, 총부유물 농도는 F3, D5를 제외하면 모두  $1 g/m^3$  이하였다(F3은  $1.39 g/m^3$ , D5는  $1.13 g/m^3$ ).

Fig. 2에서 각 정점 별 색소 흡광 스펙트럼을 도시하였다. 해색(ocean color)센서가 전형적으로 가지는 분광밴드에서의 흡광계수를 나타내기 위해, 천리안 해양위성(GOCI: Geostationary Ocean Color Imager)의 분광반응함수와 합성곱(convolution)하여 나타낸 밴드별 흡광계수를 빨간 점으로 나타내었다. 구조류 우점 해수의 흡광 스펙트럼(Fig. 2(a))은 잘 알려진 대로 435 nm 부근과 673 nm 인근에서 첨두(尖頭)값을 가지는 쌍봉 형태의 모양을 가졌고, 엽록소 농도가 높을수록 전체적으로 높은 흡광계수를 나타내었다. *Alexandrium* 우점 해수(Fig. 2(b))는 시료의 높은 엽록소 농도로 인해 색소 흡광이  $1.2 m^l$ 에 달할 정도로 높게 나타났다. 스펙트럼 모양에서 특이할 만 한 점은 (1) 400 nm 이하에서의 경향성의 차이와 (2) 400 nm - 500 nm 사이에서의 특징적인 흡광계수 변화이다. 구조류 우점 해수는 400 nm 이하에서 400 nm - 440 nm 구간에서의 기울기와 비슷한 비율로 점차 하강하는 반면, *Alexandrium* 해수는 단파장으로 갈수록 크게 반등하여 결과적으로 395 nm - 396 nm 부근에서 깊은 골을 형성함을 볼 수 있다(엽록소 농도가 높을수록 골의 중심이 396 nm 방향으로 이동함).

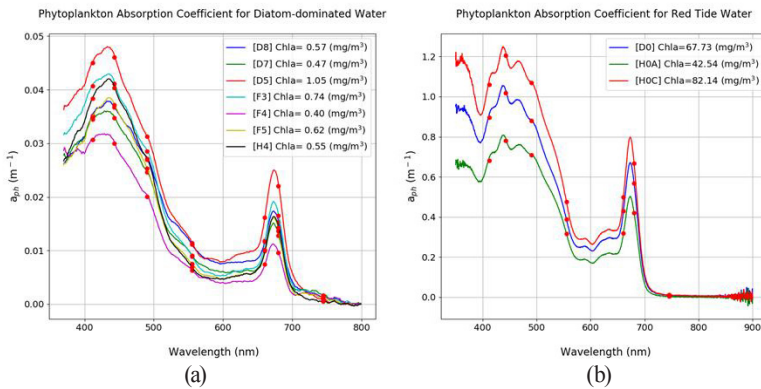


Fig. 2. Spectrum of absorption coefficient for (a) diatoms and (b) *Alexandrium*. Coefficients after the convolution with the spectral response functions of GOCI are presented in red circles

규조류 우점 해수는 400 nm - 500 nm 사이에서 비교적 매끄러운 단봉(unimodal) 형태의 곡선을 가지는 반면, *Alexandrium* 해수는 421 nm(완만한 기울기), 439 nm(첨두), 453 nm(골), 467 nm(첨두)에서 기울기의 큰 변화를 나타내고 있다. 적색 파장대 영역(600 nm - 700 nm)에서의 첨두는 규조류 우점 해수와 유사하게 673 nm에서 나타났다.

Fig. 3에서는 GOCI 분광 밴드의 6개 파장에 대하여 엽록소 농도의 변화에 따른 각 시료의 특정 흡광계수와 최적화 곡선을 나타내었다. 규조류 우점, *Alexandrium* 우점 해수 모두에서, 파장에 관계없이 엽록소 농도가 높아질수록  $a_{ph}^*$ 가 작아지는 것을 볼 수 있는데, 작아지는 정도는 단파장일수록 큰 것을 볼 수 있다(즉, 지수 B의 값이 단파장일수록 큼). 한 가지 유의할 점은 *Alexandrium* 우점 해수의 경우 시료의 엽록소 농도가 40 mg/m<sup>3</sup> - 100 mg/m<sup>3</sup>로 고농도 범위에 집중되어 있고, 규조류 우점 시료는 모두 1.5 mg/m<sup>3</sup> 이하라는 점이다.

Fig. 4에 시료로부터 얻은  $A(\lambda)$ 와  $B(\lambda)$ 곡선을 도시하였다.  $A(\lambda)$ 의 값은 엽록소 농도가 1 mg/m<sup>3</sup>일 때의 특정 흡광계수로 해석할 수 있고( $a_{ph}^*(\lambda) = A(\lambda)(1)^{-B(\lambda)} = A(\lambda)$ ), 이는 다시 흡광계수와 동일함을 알 수 있다( $a_{ph}^*(\lambda) = a_{ph}(\lambda)/1 = a_{ph}(\lambda)$ ). Fig. 4(a)를 볼 때, 엽록소 흡광계수는 1 mg/m<sup>3</sup>의 저농도 수준에서 *Alexandrium*이 약 1.5배에서 2배가량 큰 것으로 유추해볼 수 있다.  $B(\lambda)$  곡선의 경우(Fig. 4(b)), 규조류 우점 해수는 400 nm에서 650 nm로 파장이 커짐에 따라 지수가 점진적으로 감소하는 것을 볼 수 있지만, *Alexandrium* 우점 해수는 뚜렷한 경향성이 없는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3(a)에서 규조류 우점 해수 단파장(412 nm, 443 nm, 490 nm)에 대한 그래프의 기울기가 장파장(555 nm, 660 nm, 680 nm)에 대한 그래프보다 극명하게 가파른 것으로 확인할 수 있다.

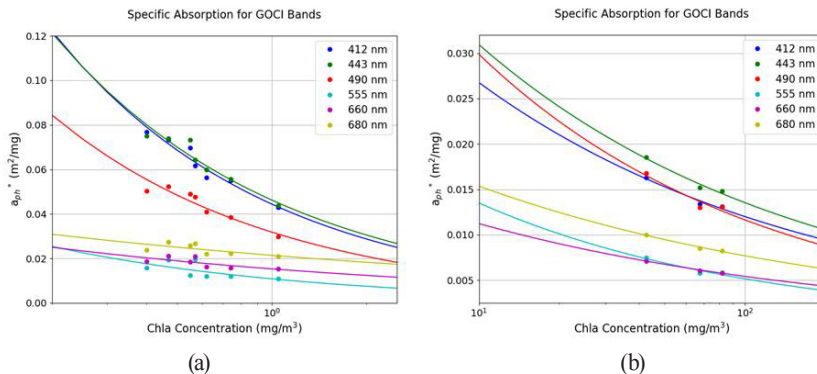
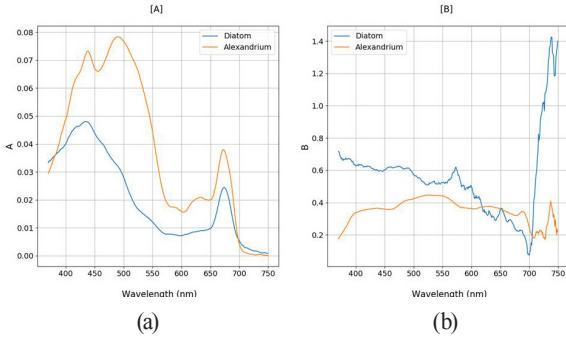


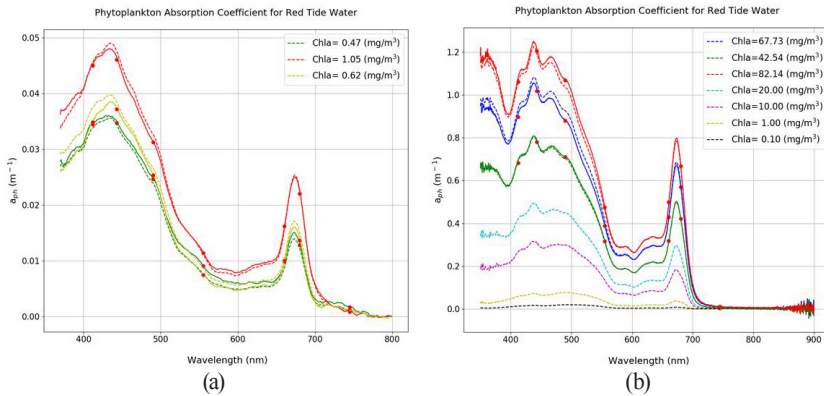
Fig. 3. Specific pigment absorption coefficient for (a) diatoms and (b) *Alexandrium*. Curves are presented for the 6 GOCI bands





**Fig. 4.** Curves for (a) A and (b) B coefficient in the pigment absorption modeling

Fig. 5는 Eq. (1)의 모델을 통해 도출된  $a_{ph}$  값을 실제 측정된  $a_{ph}$  값과 비교한 그래프이다. 모델  $a_{ph}$  값과 측정  $a_{ph}$  값이 크게 다르지 않음을 볼 수 있다. 규조류 우점 해수의 경우(Fig. 5(a)), 그래프의 가독성을 위해, 엽록소 농도가 높은 시료(1.05 mg/m<sup>3</sup>), 중간 시료(0.62 mg/m<sup>3</sup>), 낮은 시료(0.47 mg/m<sup>3</sup>)를 선택하여 도시하였고, *Alexandrium* 우점 해수의 경우, 세 정점에서의 시료에 더불어, 그 시료가 나타내지 못하는 엽록소 범위(0 mg/m<sup>3</sup> - 40 mg/m<sup>3</sup>)에서의 엽록소 흡광을 분석하기 위하여 0.1 mg/m<sup>3</sup>, 1.0 mg/m<sup>3</sup>, 10 mg/m<sup>3</sup>, 20 mg/m<sup>3</sup>에서의 모델 값을 생성하여 도시하였다.



**Fig. 5.** Specific pigment absorption coefficient for (a) diatoms and (b) *Alexandrium*. Red dots in the curve represent the 6 GOCI bands

모델을 통한 색소 흡광 스펙트럼과 측정된 스펙트럼을 비교해보았을 때, 스펙트럼 전체의 크기에 있어서 다소간의 오차는 있으나 전반적으로 유사한 스펙트럼의 모양을 지닌 것으로 나타났다. *Alexandrium* 우점 해수에 대해서도 엽록소 농도 40 mg/m<sup>3</sup> 이상의 고농도 시료에 대해서 모의가 잘 이루어진 것을 볼 수 있다.

부유물 흡광은 일반적으로 부유물 농도가 증가할수록 단조 증가(monotonically increasing)할 것으로 기대되었지만, Fig. 6에서 나타난 바와 같이 440 nm에서의 부유물 흡광은 여과지로 측정된 부유물 농도, 탁도계로 측정된 탁도 모두와 높은 상관관계를 보여주지는 않았다. 엽록소와 용존 유기물 흡광 역시 유의미한 관계를 나타내지 않았다. 총부유물(detritus) 및 용존 유기물(gelbstoff)에 대한 개별적인 흡광계수 스펙트럼은 Fig. 7에 도시하였다. 그림에서 곡선의 색은 다른 시료를 의미하고, 곡선의 형태는 각각 부유물, 용존 유기물, 그리고 그 합을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 규조류 우점해수와 *Alexandrium* 우점해수 모두, semi-log plot의 형태에서 다소간의 기울기의 변화는 있지만 직선에 가깝게 나타나 Eq. (2)와 같이 흡광계수 스펙트럼에 대한 지수함수 형태의 모델링이 타당함을 보여주고 있다.

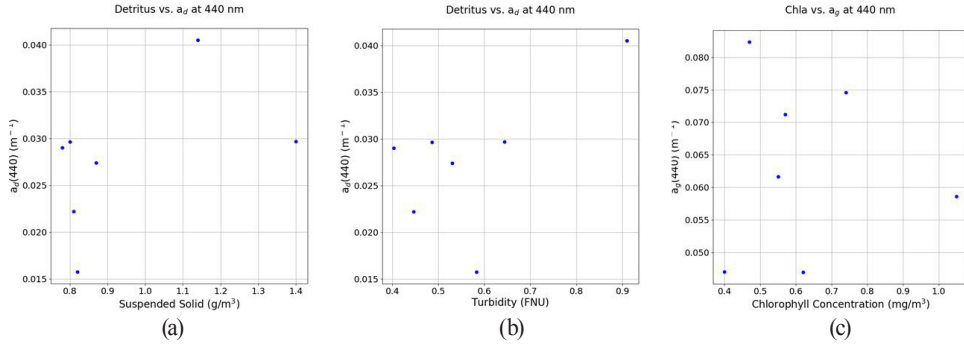


Fig. 6. Scatter plots for diatom-dominated waters between (a) suspended solid vs. detritus absorption coefficient at 440 nm, (b) turbidity vs. detritus absorption coefficient at 440 nm, and (c) chlorophyll concentration vs. gelbstoff absorption at 440 nm

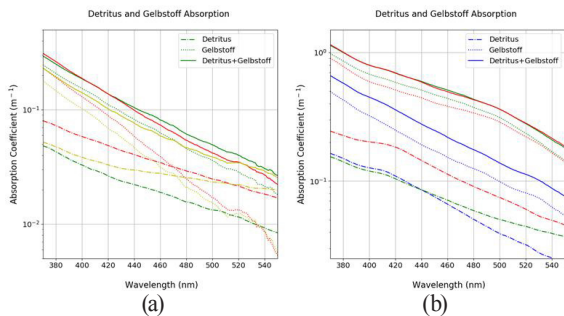


Fig. 7. Semi-log plots for gelbstoff, detritus, and combined absorption for (a) diatoms and (b) *Alexandrium*

부유물과 용존유기물 흡광의 합, 즉  $a_{dg}(\lambda)$ 는 Fig. 8과 같이 나타났고, 구조류 우점 해수의 경우 지수부의 계수  $s$ 를 0.015, *Alexandrium* 우점 해수의 경우 0.01과 0.015로 조정하여 측정값과 같이 도시하였다. *Alexandrium* 우점 해수에서 440 nm를 기준으로 단파장에서는 과대추정, 장파장에서는 과소추정이 나타나지만, 0.01의 경우가 전반적인 오차가 더 작은 것을 볼 수 있었다.

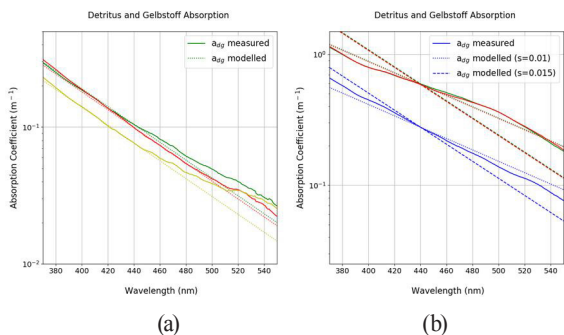


Fig. 8. Semi-log plots for the detritus and gelbstoff absorption coefficient for (a) diatoms and (b) *Alexandrium*. Measured spectrum are drawn with solid lines and modeled spectrum are with dashed lines

#### 4. 토 의

색소 흡광 측정에서 엽록소 농도가 낮은 *Alexandrium* 우점 시료가 없었기 때문에, 저농도에서의 색소 흡광 결과가 부정확할 수 있다. 이는 현장 해수에서는 *Alexandrium* 생물 개체 비율이 낮으면 다른 구조류가 우점하게 되어, 순수히 *Alexandrium* 생물종만 저농도로 존재하는 경우가 발생하기 힘들기 때문이다. 본 연구에서도 *Alexandrium* 개체수가 2% - 10%인 시료가 존재하지만, 이 경우 모두 구조류의 개체수가 수십 배 많았기 때문에, 그러한 시료에서 얻는 색소 흡광 자료가 저농도 *Alexandrium*을 대표하지 못한다고 보았다. 마찬가지로 고농도의 구조류, 즉 엽록소 농도가 1.5 mg/m<sup>3</sup>를 넘는 구조류 해수 역시 획득하지 못하였다.

*Alexandrium* 우점 해수에서 400 nm - 500 nm 사이에서 나타나는 곡선의 굴곡은 원격탐사에서 주요한 변수인 원격탐사 반사도(remote sensing reflectance)에서도, 초분광 센서로 측정될 경우 구조류 및 *Alexandrium* 해수 간에 고차 미분 곡선에서 차이를 나타낼 것으로 보이며, 초분광 센서의 분광해상도(spectral resolution)에 대한 요구조건을 도출할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 분광 스펙트럼의 신호대 잡음 비율(signal-to-noise ratio)을 높이기 위하여 low-pass filter를 적용하는 하는 경우에도 과도한 합성곱의 폭으로 인하여 스펙트럼 상의 굴곡이 사라지지 않도록 유의하여야 함을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 2017년 통영 인근 해역에서 발생한 *Alexandrium affine* 적조 종에 대하여 색소 흡광, 부유물 흡광, 용존유기물 흡광을 측정하여, 구조류 우점 해수에 대한 측정값과 비교 분석하였다. *Alexandrium affine* 우점 해수의 색소 흡광

스펙트럼은 400 nm 이하에서 단파장으로 갈수록 감소하는 구조를 우점 해수와는 달리, 443 nm에서의 침투 값에 준하는 수준으로 다시 증가하는 것을 관측하였고 그 최고치는 엽록소 농도가 높을수록 크게 나타났다. 또한, *Alexandrium* 우점 해수는 400 nm - 500 nm 구간에서도 구조를 우점해수와 다른 색소 흡광 양상을 나타내었는데, 421 nm에서 완만한 기울기, 439 nm에서 침투, 453 nm에서 골, 467 nm에서 침투를 나타내며 1차 또는 2차 미분 성분에 변화가 큰 것이 특징적이라 할 수 있다. 색소 흡광에 있어서의 집적 효과는 구조를 우점 해수와 *Alexandrium* 우점 해수에서 크게 다른 것으로 나타났으며, 이는 반분석적 모델(semi-analytical model) 등에서 엽록소 농도와 색소 흡광 간의 관계식을 완전히 다르게 구성해야 함을 시사한다.

부유물 및 용존 유기물 흡광( $a_{dg}(\lambda)$ )을 모델링 할 시에도 구조를 해수에 일반적으로 많이 쓰는 지수부 계수인  $s = 0.015$ 는 *Alexandrium* 우점 해수에 적절하지 않은 것으로 나타났고, 약  $s = 0.01$ 을 사용할 경우가 흡광 특성 모델링에 더 적합한 것으로 나타났다. 또한, 이미 알려진 바대로 보다 정밀한 부유물 및 용존 유기물 흡광 모델링을 위해서는 단일 지수 함수의 사용보다는 두 개 이상의 지수함수의 사용이 보다 현장 자료에 적합할 수 있음이 본 연구에서도 확인되었다.

본 연구는 우리나라 주변 해역에서 나타나는 적조 중에 대한 흡광 특성을 실측 자료를 통해 측정하여 향후 광학적인 모델링에 사용될 수 있는 근거를 마련하였다는 의의가 있고, 다분광 측정에서는 다소 구별하기 어려운 구조와 적조 종간의 흡광 특성을 제시함으로써 초분광 센싱을 이용한 종 구분 가능성을 제시하였다. 향후, 고차 미분을 통한 구조-적조 종간의 구분, 나아가 적조 종간의 구분을 위한 연구가 수행되어야 한다.

### 감사의 글

이 논문은 한국해양수산진흥원 “적조피해 최소화를 위한 적조탐지·예측시스템 구축 및 실증화(PM61410)” 및 연구재단 “원격 수질추정을 위한 초분광 영상의 대기보정 모듈 개발”과제의 지원을 받아 진행되었습니다. 현장관측 및 실험실 시료 측정에 도움을 주신 한국해양과학기술원 문정언 연구원에게 깊은 감사를 표합니다.

### References

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

*Environment*, Vol. 103, No. 4, pp. 419-437.

Babin, M., Therriault, J.C., Legendre, L., and Condal, A. (1993), Variations in the specific absorption coefficient for natural phytoplankton assemblages: Impact on estimates of primary production, *Limnology and Oceanography*, Vol. 38, No. 1, pp. 154-177.

Bricaud, A., Babin, M., Morel, A., and Claustre, H. (1995), Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 100, No. C7, pp. 13321-13332.

Carder, K.L. and Steward, R.G. (1985), A remote-sensing reflectance model of a red-tide dinoflagellate off west Florida, *Limnology and Oceanography*, Vol. 30, No. 2, pp. 286-298.

Carreto, J.I., De Marco, S.G., and Lutz, V.A. (1989), UV-absorbing pigments in the dinoflagellates *Alexandrium excavatum* and *Prorocentrum micans* effects of light intensity, *Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology*, Vol. 69, pp. 331-335.

Devred, E., Sathyendranath, S. Stuart, V., Maass, H., Ulloa, O., and Platt, T. (2006), A two-component model of phytoplankton absorption in the open ocean: Theory and applications, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 111, No. C3.

Dierssen, H.M., Kudela, R.M., Ryan, J.P., and Zimmerman, R.C. (2006), Red and black tides: Quantitative analysis of water-leaving radiance and perceived color for phytoplankton, colored dissolved organic matter, and suspended sediments, *Limnology and Oceanography*, Vol. 51, No. 6, pp. 2646-2659.

Hallegraeff, G.M. (1993), A review of harmful algal blooms and their apparent global increase, *Phycologia*, Vol. 32, No. 2, pp. 79-99.

Hu, C., Muller-Karger, F.E., Taylor, C.J., Carder, K.L., Kelble, C., Johns, E., and Heil, C. A. (2005), Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97, No. 3, pp. 311-321.

Jeffrey, S.T. and Humphrey, G.F. (1975), New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton, *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, Vol. 167, No. 2, pp. 191-194.

Kahru, M. and Mitchell, B.G. (1998), Spectral reflectance and absorption of a massive red tide off southern California,

- Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 103, No. C10, pp. 21601-21609.
- Kim, E.S., Li, Z., Oh, S.J., Yoon, Y.H., and Shin, H.H. (2017), Morphological identification of *Alexandrium* species (*Dinophyceae*) from Jinhae-Masan Bay, Korea, *Ocean Science Journal*, Vol. 52, No. 3, pp. 427-437.
- Kim, W., Han, T.H., Choi, J.M., Jung, S.W., and Kang, D. (2018), Investigating optical properties of red tide in a turbid coastal area near Tongyeong, South Korea, *OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO) 2018*, 28-31 May, Kobe, Japan, pp. 1-5.
- Kishino, M., Takahashi, M., Okami, N., and Ichimura, S. (1985), Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea, *Bulletin of Marine Science*, Vol. 37, No. 2, pp. 634-642.
- Lee, C.K., Park, T.G., Park, Y.T., and Lim, W.A. (2013), Monitoring and trends in harmful algal blooms and red tides in Korean coastal waters, with emphasis on *Cochlodinium polykrikoides*, *Harmful Algae*, Vol. 30, pp. S3-S14.
- Lee, Z. and Carder, K.L. (2004), Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 89, No. 3, pp. 361-368.
- Leong, S.C.Y. and Taguchi, S. (2006), Detecting the bloom-forming dinoflagellate *Alexandrium tamarense* using the absorption signature, *Hydrobiologia*, Vol. 568, No. 1, pp. 299-308.
- Millie, D.F., Schofield, O.M., Kirkpatrick, G.J., Johnsen, G., Tester, P.A., and Vinyard, B.T. (1997), Detection of harmful algal blooms using photopigments and absorption signatures: A case study of the Florida red tide dinoflagellate, *Gymnodinium breve*, *Limnology and Oceanography*, Vol. 42, No. 52, pp. 1240-1251.
- Morel, A. and Bricaud, A. (1981), Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton, *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, Vol. 28, No. 11, pp. 1375-1393.
- Nakanishi, K., Masao, A., Sako, Y., Ishida, Y., Muguruma, H., and Karube, I. (1996), Detection of the red tide-causing plankton *Alexandrium affine* by a piezoelectric immunosensor using a novel method of immobilizing antibodies, *Analytical Letters*, Vol. 29, No. 8, pp. 1247-1258.
- Park, T.G., Lim, W.A., Park, Y.T., Lee, C.K., and Jeong, H.J. (2013), Economic impact, management and mitigation of red tides in Korea, *Harmful Algae*, Vol. 30, pp. S131-S143.
- Roesler, C.S., Perry, M.J., and Carder, K.L. (1989), Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters, *Limnology and Oceanography*, Vol. 34, No. 8, pp. 1510-1523.