

## 해색원격탐사 활용을 위한 적조생물종 고유 광특성 연구

안유환<sup>1</sup> · 문정언<sup>1</sup> · 서원찬<sup>2</sup> · 윤홍주<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 해양위성센터

<sup>2</sup>부경대학교 소재프로세스공학과

<sup>3</sup>부경대학교 위성정보공학과

## Inherent Optical Properties of Red Tide Algal for Ocean Color Remote Sensing Application

Yu-Hwan Ahn<sup>1</sup>, Jeong-Eon Moon<sup>1</sup>, Won-Chan Seo<sup>2</sup> and Hong-Joo Yoon<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Korea Ocean Research and Development Institute

<sup>2,3</sup>Pukyong National University

### 요 약

적조 종에 따라 해색이 다르다는 점에 착안해 해색 모델로부터 적조 종을 역 추정하는 기술을 개발하는데 있어 기본 입력 변수가 되는 적조 생물에 관한 고유의 광특성(흡광, 역산란 특성)을 연구하였다. 실험실 수준에서의 적조 생물의 광특성을 조사하기 위해 남해에서 채취된 21종의 적조 생물을 배양하고 spectrophotometer를 이용해 광합성 색소에 의한 흡광계수(absorption coefficient,  $a$ )와 역산란계수(backscattering coefficient,  $b_b$ )를 측정하였다. 또한 spectrophotometer를 이용해 측정된 흡광 및 역산란 계수와 클로로필 농도를 이용하여 비 흡광계수( $a^*$ )와 비 역산란계수( $b_b^*$ )를 계산하였으며 이들 스펙트럼의 모양과 값을 비교하였다. 적조 생물 종에 따른  $a^*$ 은 파장대 440nm에서 0.005~0.06  $m^2 \cdot mg^{-1}$ 의 값을 가지며,  $b_b^*$ 의 범위는  $10^{-2} \sim 10^{-4} m^2 \cdot mg^{-1}$ 로 종 간 약 100배의 차이가 있었다. 이와 같이 적조생물 종에 따라 스펙트럼의 모양과 값에서 차이를 나타냈으며 21종의 적조 생물 중에서 해색 스펙트럼으로 중간 구분이 가능한 종은 7-8종이었다. 이 결과는 해색모델 개발의 입력변수로 활용될 수 있을 것이다.

**Abstract** – This research is about the inherent optical properties(IOPs) of algae which is collected from Nam-Hae for basic research of red tide remote sensing technique development. 21 kinds of red tide organisms were cultivated to investigate IOPs of them in the level of laboratory, and specific absorption coefficient of phytoplankton( $a^*$ ) and backscattering coefficient of phytoplankton( $b_b^*$ ) are estimated by using spectrophotometer. Absorption spectrums according to species appeared to range from 0.005 to 0.06 ( $m^2 \cdot mg^{-1}$ ), and the shapes of spectrums were also different. The range of  $b_b^*$  appeared to be  $10^{-2} \sim 10^{-4} m^2 \cdot mg^{-1}$ , which had about 100 times differences between species, and the shape of spectrum have significant difference between species. These results will input as a remote sensing reflectance model input parameter from ocean color.

**Keywords:** Absorption coefficient(흡광계수), Backscattering coefficient(역산란계수), Optical properties of red tide(적조생물 광 특성)

### 1. 서 론

적조는 해마다 발생 범위가 광역화되고, 발생 빈도와 농도 그리고 지속일수가 증가하는 추세이다. 그에 따라 관광 산업, 어업 및

양식업 등의 경제적 피해도 증가하고 있으며 경제적 손실액도 증가하고 있어 적조 현상은 심각한 사회·경제적인 문제로 대두되고 있다(국립수산과학원[2000]; 국립수산과학원[2003]). 따라서 적조의 조기 모니터링 및 예측이 더욱더 중요시 되고 있다. 적조를 모니터링 하기위해 기존에는 주로 선박을 이용해 왔으나 이는 인력, 비용, 시간적 측면에서 비효율적일 뿐만 아니라 점점 광역화되어

<sup>†</sup>Corresponding author: yoonhj@pknu.ac.kr

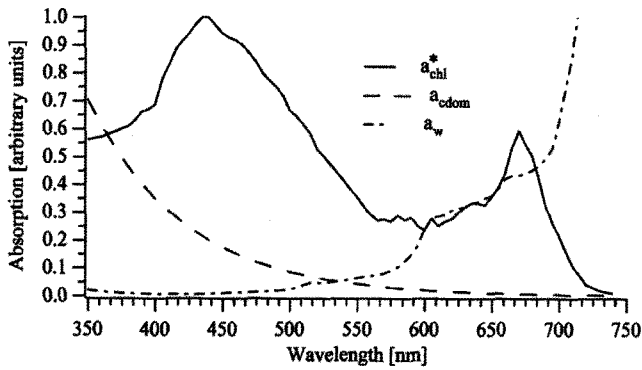


Fig. 1. Spectral variation of absorption in seawater. Qualitative comparison of the shapes of absorption spectra of puer water ( $a_w$ ), specific absorption by chl ( $a_{chl}^*$ ) (Sathyendranath *et al.*[1987]) and CDOM ( $a_{cdom}$ ).

발생하고 있는 적조 발생 영역을 관리하기에는 어려움이 있다. 따라서 주기적이고 광역적으로 적조발생을 감시하고 모니터링 할 수 있는 항공기나 위성을 통한 원격탐사를 이용하는 것이 효율적이다.

적조 모니터링을 하기 위한 원격탐사기술로는 해양원격탐사의 한 분야인 해상원격탐사(Ocean color remote sensing)가 있다. 이 기술은 인공위성 또는 항공기 등에 탑재된 센서에 의해 측정된 가시광 영역의 광에너지(radiance)를 이용해 해수 내에 포함된 다양한 물질의 양과 종류를 알아내는 기술이다. 여기서 이용되는 광에너지는 수중으로 입사한 태양광이 해수 밖으로 반사되어 나오는 광에너지(water leaving radiance)이다. 해수특성에 따라 수색이 변하게 되는데 이는 빛을 반사시키는 해수 중의 물질들에 따른 광특성의 차이로 나타나는 현상으로 이러한 예는 Fig. 1에서 볼 수 있다. Fig. 1의 실선은 식물플랑크톤 엽록소(Chlorophyll)에 의한 비흡광계수, 점선은 용존유기물(CDOM)에 의한 흡광계수이며, 쇄선은 순수한 물에 의한 흡광계수를 나타낸다. 이렇듯 흡광 스펙트럼의 값과 모양에 의해 물질들의 종류와 양을 알 수 있다.

해수의 광특성은 고유의 광특성(Inherent Optical Properties; IOPs)과 외형적 광특성(Apparent Optical Properties; AOPs)으로 분류되며, IOPs와 AOPs의 관계는 Fig. 2와 같다. IOP는 주어진 해수의 고유 광특성으로 외부의 광학적 상황에 관계없이 일정한 값을 가지는 특성이며 현장관측이 어려워 주로 실험실 내에서 측정된다. IOP 항목으로는 흡광계수(absorption coefficient,  $a$ ), 소산계수(attenuation coefficient,  $c$ ), 역산란계수(backscattering coefficient,  $b_b$ )가 있으며, AOP 항목으로는 원격반사도(Remote Sensing Reflectance;  $R_{rs}$ ), 수출광량(Water Leaving Radiance;  $L_w$ ), 총하향광량(Downwelling irradiance;  $E_d$ ), 총상향광량(Upwelling irradiance;  $E_u$ ) 등이 있다.

적조 원격탐사의 분석적 접근을 위해 식물플랑크톤의 흡광 스펙트럼에 관한 많은 연구가 수행되었다. Cader and Steward[1985]에 의하여 처음 적조 원격탐사 전문 알고리즘 개발이 시도되었다. 이들은 플로리다 연안에 발생한 *Dinoflagellate* bloom을 중심으로 헬기에 Spectro-radiometer를 사용하여 Remote reflectance를 측정 한 후 모델에 의하여 적조생물의 농도를 구하였다. 그러나 이 연구에서는 다양한 적조생물에 대한 연구가 아니라 오직 한 종에 대하여서만 모델링함으로써 다양하고 일반적인 환경에서 사용할 수 없고 적조생물의 광학적인 특성이 전혀 규명되지 않았다는 문제점이 있었다.

또 다른 연구에서 식물플랑크톤의 흡광 스펙트럼의 크기와 모양이 변한다는 사실을 현장관측을 통해 밝혀냈으며(Ciotti *et al.* [2002]; Hoepffner and Sathyendranath[1991]; Kirk[1986]; Sathyendranath *et al.*[1987]), 이는 식물플랑크톤이 가진 색소(Bidigare *et al.*[1990]; Hoepffner and Sathyendranath[1991])나 셀의 크기(Ciotti *et al.*[2002])에 따라 다르게 나타난다는 사실이 알려졌다.

역산란 계수는 흡광계수에 비해 아주 작은 값을 가지며, 흡광계수와 함께 다른 물질과 식물플랑크톤을 구분할 수 있는 중요한 광특성이다(Robert *et al.*[2004]; Ahn *et al.*[1992]).

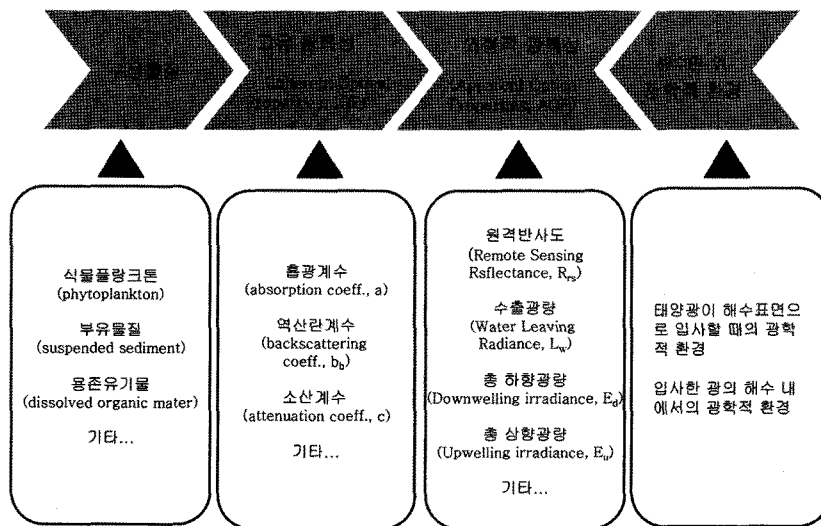


Fig. 2. Cause-effect chain.

본 연구는 원격탐사를 이용하여 적조 생물을 구분하는 분석적 접근 방법으로 우리나라 주변해역에서 적조를 유발하는 식물플랑크톤에 대한 고유광특성을 분석하는데 그 목적이 있다.

## 2. 연구재료 및 방법

### 2.1 적조생물종 배양

본 연구에 사용한 적조생물종은 한국 주변 해역에서 채집된 21종의 식물플랑크톤이며, 식물플랑크톤 분류군에 따라 외편모조류 13종, 침편모조류 1종, 녹조류 3종, 유글레나류 1종, 작편모조류 1종, 그리고 규조류 2종 이다(Table 1). 이들을 Pasteur-pipette 법으로 분리하여 순수 배양하였으며(Hallegraeff[1995]), 배양조건은 온도 20±1 °C, 광도 70 μmol·m<sup>-2</sup>·s, 광주기 14 h Light : 10 h Dark로 일정하게 유지하여 종에 따라 2-3 주간 배양하였다. 배양에 사용된 배지는 0.2 μm의 Millipore로 2번 거른 후 멸균한 해수에 실리카이트(Si)가 첨가되지 않은 f2 솔루션(Guillard and Rthier[1962])을 첨가하여 사용하였고, 규조류에는 실리카이트를 첨가한 배지를 사용하였다.

배양이 완료된 배지는 IOPs 측정 시 각 항목에 적절한 농도로 조절하여 사용하였는데 농도가 높은 것은 희석하고 묽은 것은 농

축하여 사용하였다. 입자크기 분포와 흡광계수 측정 시에는 묽은 시료를 사용하였고 역산란계수는 신호가 매우 약하므로 고농도의 시료를 사용하였다. 농도를 묽히기 위해서 멸균된 해수를 시료에 희석하였고, 농축에는 중력을 이용하여 필터로 걸러내는 방법을 사용하였다.

### 2.2 적조 생물 종의 엽록소 농도

적조 생물의 엽록소 농도를 측정하기 위해 준비된 시료를 GF/F(Glass Fiber Filter) 47 mm를 이용하여 필터가 착색될 때까지 여과하였다. 여과된 필터는 색소 추출을 위해 20 ml vial 용기에 10 ml 아세톤과 담아 빛이 차단되게 은박지로 싸서 4 °C 냉장고에 24시간 동안 보관하였다. 색소 용액만을 추출하기 위해 아세톤에 녹지 않는 25 mm membrane PTFE type(Model MFS-25) 필터를 유리주사기에 부착하여 필터 찌꺼기 등을 걸러내었다. 이렇게 추출된 색소 용액은 PERKIN-ELMER co.의 Lambda 19 dual Spectrophotometer를 이용해 흡광도를 측정하였다. 측정된 Optical Density 값을 Jeffrey and Humprey[1975]의 식에 대입하여 엽록소 농도를 분석하였다(Eq. 1). 엽록소 농도를 간단히 <math>chl</math>라고 나타내며, 단위는 mg·m<sup>-3</sup>이다.

$$\langle chl \rangle (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}) = \frac{C \times v}{V} \quad (1)$$

여기서, C=11.85 E<sub>664</sub>-1.54 E<sub>647</sub>-0.08 E<sub>630</sub>

E<sub>i</sub>: spectrophotometer를 이용해 측정된 색소의 파장별 O.D.

v: 색소 추출을 위해 사용된 90% 아세톤의 양, ml

V: 여과한 시료의 양, L

### 2.3 적조 생물 종의 입자 크기 및 내부 엽록소 농도 측정

배양된 적조 생물종의 입자 크기와 엽록소 농도를 측정하였다. 입자 크기를 측정하기 위해서 현미경을 이용하였으며, 입자 크기는 장경과 단경의 평균치를 사용하였다.

내부 엽록소 농도를 계산하기 위해서 샘플의 단위 부피당 엽록소 농도 (μg·ml<sup>-1</sup>)와 입자 수(cells·ml<sup>-1</sup>)를 측정하였다. 엽록소 농도는 2.2절에서 spectrophotometer를 이용해 측정된 값을 이용하였으며, 샘플의 입자 수를 측정하기 위해 전기적 입자계수기인 Multisizer III Coulter Counter를 이용하였다. 내부 엽록소 농도는 측정된 엽록소 농도를 cell density로 나누어 계산되며 단위는 μg·cell<sup>-1</sup>이다.

### 2.4 적조생물종의 흡광계수(a, absorption coefficient)와 비흡광계수(a\*, specific absorption coefficient)

흡광계수(a, absorption coefficient)란 매질을 투과하는 광속에 의하여 단위 거리 당 흡수되는 광 에너지의 크기이며, 흡광도를 측정하기 위해서 주로 filter technique을 이용한 방법과 부유상태로 측정하는 방법을 이용한다. filter technique은 해수 입자를 필터가 착색될 때까지 샘플을 여과시킨 후 착색된 필터를 광 측정 기기인 spectrophotometer 내부의 광전판 앞에 부착하고 Optical

**Table 1.** Cultured phytoplankton species, strain and sampling sites

Species	Strain	Sampling site
<b>Dinophyceae (외편모조류)</b>		
<i>Alexandrium catenella</i>	AxCt_K01	진해 난포
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	CcPk_K04	고흥 나로도
<i>Gymnodinium catenatum</i>	GnCt_K 01	진해 난포
<i>Gymnodinium sanguineum</i>	GnSg_K 01	거제 장목만
<i>Gyrodinium sp.</i>	Gnsp_K01	거제 장목만
<i>Gyrodinium aureolum</i>	GrAr_K01	거제 칠천도
<i>Gyrodinium impudicum</i>	GrIp_K02	군산 하제
<i>Heterocapsa triquetra</i>	HtTq_K01	거제 장목만
<i>Prorocentrum minimum</i>	PrMn_K01	군산 하제
<i>Prorocentrum micans</i>	PrMc_K01	군산 하제
<i>Prorocentrum dentatum</i>	PrDt_K01	거제 장목만
<i>Prorocentrum triestium</i>	PrTe_K01	거제 장목만
<i>Serippsiella trochoidea</i>	SpTc_K01	군산 하제
<b>Raphidopeaceae (침편모조류)</b>		
<i>Chattonella sp.</i>	Ctsp_K01	거제 장목만
<b>Chlorophyceae (녹조류)</b>		
<i>Chlamydomonas sp.</i>	Clsp_K01	-
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	KMCC C_20	Japen
<i>Chlorella schroeteri</i>	KMCC C_22	Nadong
<b>Euglenophyceae (유글레나류)</b>		
<i>Eutripiella gymnastica</i>	EtGn_K01	진해 난포
<b>Haptophyceae (작편모조류)</b>		
<i>Isocrysis galbana</i>	KMCC H-2	DE-5
<b>Bacillariophyceae (규조류)</b>		
<i>Coscinodiscus sp.</i>	Cssp_K01	거제 장목만
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	KMCC B-46	일본

Density(O.D.)값을 측정하는 방법이다. filter technique를 이용한 방법의 특징은 S/N 값이 우수한 안정된 신호를 얻을 수 있다는 것이다. 하지만 filter와 입자간의 상호작용에 의한 multiple absorption 효과( $\beta$  effect)로 인해 O.D. 값이 부유상태로 측정할 때보다 약 2 배 이상 높게 측정된다. 따라서 filter technique을 이용하여 측정 한 흡광도 스펙트럼은 별도의 보정이 필요하다.

또 다른 방법으로는 부유상태로 측정하는 방법이다. 시료를 Optical Cell에 담아 spectrophotometer를 이용하여 O.D. 값을 측정한다. 부유상태로 측정할 때의 문제점은 시료의 농도가 충분치 않으면 안정적인 신호를 얻을 수 없다는 것이다. 또한 광 산란에 의한 에너지의 일부를 센서가 모두 회수하지 못하기 때문에 이를 해결하기 위해 sample cell을 적분구(integrating sphere) 내에 넣어서 측정하는 방법과 sample cell을 최대한 적분구에 가까이 두고 측정하여 산란광을 회수하는 방법이 있다.

본 연구에서는 부유상태로 흡광도를 측정하였으며 산란광을 회수하기 위해 sample cell을 적분구 바로 앞에 두고 측정하였다. 파장에 따른 흡광도를 측정하기 위해 사용된 기기는 적분구가 부착된 dual spectrophotometer이다. 여기서 baseline 측정에 사용된 샘플은 적조생물 배양에 사용된 배지와 동일한 것을 사용하였다. baseline 측정이 끝난 후 reference cell은 그대로 두고 측정하고 자하는 샘플을 target에 두고 흡광도를 측정하는데 이때 사용된 optical cell은 1 cm의 크기를 이용하였으며, 파장 범위는 400~750 nm까지 1 nm 간격으로 측정하였다. 이렇게 측정된 optical density(O.D.)는 spectrophotometer에 의해 측정된 기계적인 값으로 다음(Eq. 2)과 같이 정의된다.

$$O.D. = \log_{10} \frac{1}{T} \quad (2)$$

여기서  $T$ 는 투과도(Transmittance)로 초기 입사광량( $I_0$ )과 투과된 후의 광량( $I$ )의 비의 값 ( $I/I_0$ )이다(Eq. 3). 측정이론은 매질을 투과하는 광량은 매질의 두께에 대해 지수함수 적으로 감소한다는 Beer Lambert 법칙에 의해 다음과 같이 계산된다(Eq. 4).

$$T = I/I_0 \quad (3)$$

$$I = I_0 e^{-ax} \quad (4)$$

여기서  $a$ 는 흡광계수(absorption coefficient)이며,  $x$ 는 광이 투과한 거리로 매질의 광학적 두께(optical thickness)이다. (Eq. 4)을 변형하여 자연로그  $\ln$ 을 취하면,

$$a = \ln(I_0/I)/x \quad (5)$$

Eq. 3과 Eq. 5에 의하면,

$$a = \frac{\ln(1/T)}{x} \quad (6)$$

$$a = \frac{2.3025 \text{Log}(1/T)}{x} \quad (7)$$

여기서, 2.3025는 자연로그를 상용로그로 변환해주는 상수이며,

Eq. 2에 의해 흡광계수( $a$ )는 다음 Eq. 8과 같이 계산된다. 여기서 O.D.는 기기측정 값이며 단위는  $\text{m}^{-1}$ 이다.

$$a = \frac{2.3025 O.D.}{x} \quad (8)$$

본 연구에서는 흡광도 측정 시 1 cm optical cell을 사용하였으므로  $x$ 값은 0.01로 두었다. 배양된 샘플의 농도의 영향을 배제한 고유 광특성을 알아보기 위해 측정된 흡광도로부터 계산된 흡광계수는 단위 농도당 흡광계수인 비흡광 계수(Specific absorption coefficient,  $a^*$ )로 나타낸다(Eq. 9).

$$a^*(\lambda) = a(\lambda) / \langle ch \rangle \quad (9)$$

## 2.5 적조 생물 종의 산란계수( $b$ , scattering coefficient)와 역산란계수( $b_b$ , backscattering coefficient)

산란계수( $b$ , scattering coefficient)란 매질을 투과하는 광속에 의해 단위 거리 당 산란되는 광 에너지의 크기를 말한다. 파장( $\lambda$ )에 따른 광 산란계수는 측정될 수 없기 때문에 광의 흡광과 산란의 합인 소산계수( $c$ , attenuation coefficient)와 흡광계수( $a$ , absorption coefficient)의 차로 계산된다(Eq. 10).

$$b(\lambda) = c(\lambda) - a(\lambda) \quad (10)$$

산란계수는 전방산란( $b_f$ , forward scattering)과 역산란( $b_b$ , backscattering)의 합(Eq. 11)으로 전방산란은 광 진행 방향에 대해  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지 범위에서의 산란(Eq. 12)이며, 역산란은  $90^\circ$ 에서  $180^\circ$  범위에서의 산란이다(Eq. 13).

$$b = b_f + b_b \quad (11)$$

$$b_f = 2\pi \int_0^{\pi/2} \beta(\theta) \sin \theta d\theta \quad (12)$$

$$b_b = 2\pi \int_{\pi/2}^{\pi} \beta(\theta) \sin \theta d\theta \quad (13)$$

$\beta(\theta)$ 는 단위 부피( $\text{m}^3$ )에 대해  $0^\circ \sim 180^\circ$  범위의 매 각에 입사하는 irradiance(unit,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )에 대한 산란 광( $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ ) 강도의 비이다(Eq. 14).

$$\beta(\theta) = \frac{dI(\theta)}{E_0 V}, \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (14)$$

역산란 계수는 angular distribution scattered radiation(volume scattering function, VSF)인  $\beta(\theta)$ 을  $\pi/2$ 에서  $\pi$  범위까지 적분함으로써 구할 수 있다. 그러나 측정 기기가 자동화 되지 않아  $\pi/2$ 에서  $\pi$  범위를 매  $1^\circ$  마다 수동으로 측정해야 하므로 실질적으로는 불가능 하다고 할 수 있다.

부유상태의 입자는 체적산란(volume scattering)으로 후방으로 산란하는 광을 100% 회수할 수 있는 광학적인 구조가 현재로서는 불가능하기 때문에 입자에 의한 역산란 계수( $b_b$ )를 spectrophotometer로 측정할 수 있는 완전한 방법은 없다.

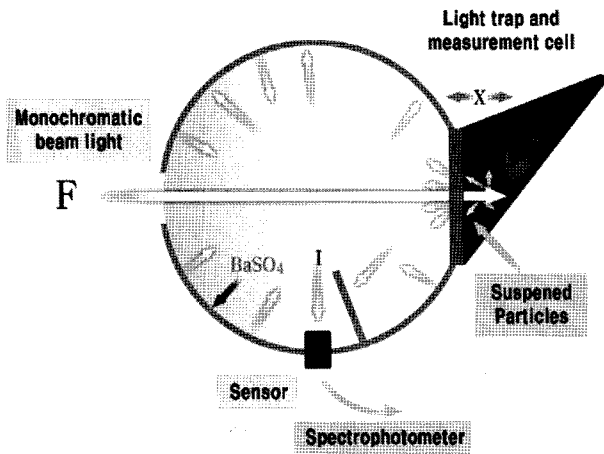


Fig. 3. Inside structure of Integrating Sphere.

본 연구에서는 Maffione and Dana(1997)의 방법에서 제시한 결과에 따라 141° 방향에서의 산란광의 세기( $\beta_{141}$ )가 총 역산란 계수와 가장 유의성이 있다고 가정하고 Eq. 15와 같이 계산하였다.

$$b_b(\lambda) = 2\pi\alpha\beta_{141}(\lambda) \quad (15)$$

결손 각에 대한 보상을 위한 기하학적 보정상수인 GF(geometric factor of optical cell)는  $b_b$ 와  $b_{bp}$ 의 비의 값으로 Eq. 16과 같다.

$$GF = b_b/b_{bp} \quad (16)$$

$2\pi\alpha$ 의 값은 GF로 식물플랑크톤의 종에 따라 5.5~7의 값을 나타내나 본 연구에서는 6으로 일정하다고 가정하였다. 따라서 측정된 역산란 계수는 다음과 같이 계산 된다(Eq. 17).

$$b_b(\lambda) = b_{bm}(\lambda) \times GF \quad (17)$$

여기서  $b_{bm}$ 은 측정된 부분 역산란 계수이며, GF 값은 optical cell에 의한 기하학적 보정상수로 6을 사용하였다. 이렇게 계산된 역산란 계수는 비흡광 계수와 마찬가지로 단위 농도당 역산란 계수인 비역산란 계수(Specific backscattering coefficient,  $b_b^*$ )로 나타낸다. 역산란 계수 측정에 사용된 기기는 적분구가 부착된 spectrophotometer로 흡광계수 측정 시 사용한 기기와 동일한 것이다.

적분구의 내부 구조는 Fig. 3과 같으며 부유상태의 입자성 물질에 의해 역산란 되는 광을 측정하는데 사용된다.

### 3. 결 과

#### 3.1 적조 생물 종의 입자 크기 및 내부 엽록소 농도

Table 2는 실험에 사용된 21 종의 적조 생물에 대한 단위 cell 당 엽록소 량을 계산한 표이다. 21 종의 내부 엽록소 농도는  $1.6 \times 10^1 \sim 4.4 \times 10^6 \mu\text{g}\cdot\text{cell}^{-1}$ 의 범위이며, 이 중에서 녹조류의 내부 엽록소 농도가 가장 낮았다. 녹조류 중에서도 *Chlorella ellipsoidea*가  $4.4 \times 10^6 \mu\text{g}\cdot\text{cell}^{-1}$ 로 가장 낮은 값을 나타냈다. 또한 외편모조류에 속하는

Table 2. Estimated Chlorophyll-a quantities per unit cell for the 21 species

Species	<Chl> ( $\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$ )	Cell Density ( $\text{cells}\cdot\text{ml}^{-1}$ )	<chl>/[Cell Density] ( $\mu\text{g}\cdot\text{cell}^{-1}$ )
<i>Alexandrium catenella</i>	92.62	4,430	$2.1 \times 10^{-2}$
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	371.29	2,290	$1.6 \times 10^{-1}$
<i>Gymnodinium catenatum</i>	17.15	432	$4.0 \times 10^{-2}$
<i>Gymnodinium sanguineum</i>	67.09	1,450	$4.6 \times 10^{-2}$
<i>Gyrodinium sp.</i>	83.32	28,800	$2.9 \times 10^{-3}$
<i>Gyrodinium aureolum</i>	11.64	830	$1.4 \times 10^{-2}$
<i>Gyrodinium imputicum</i>	63.08	1,600	$3.9 \times 10^{-2}$
<i>Heterocapsa triquetra</i>	226.03	29,500	$7.7 \times 10^{-3}$
<i>Prorocentrum minimum</i>	154.76	35,970	$4.3 \times 10^{-3}$
<i>Prorocentrum micans</i>	175.64	4,540	$3.9 \times 10^{-2}$
<i>Prorocentrum dentatum</i>	4.68	31,430	$1.5 \times 10^{-4}$
<i>Prorocentrum triestium</i>	102.80	24,470	$4.2 \times 10^{-3}$
<i>Scrippsiella trochoidea</i>	105.98	6,120	$1.7 \times 10^{-2}$
<i>Chattonella sp.</i>	121.95	2,930	$4.2 \times 10^{-2}$
<i>Chlamydomonas sp.</i>	196.04	294,927	$6.6 \times 10^{-4}$
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	43.72	10,026,400	$4.4 \times 10^{-6}$
<i>Chlorella schroeteri</i>	46.03	1,145,400	$4.0 \times 10^{-5}$
<i>Eutreptiella gymnastica</i>	224.23	75,400	$3.0 \times 10^{-3}$
<i>Isoerysis galbana</i>	276.61	1,174,173	$2.4 \times 10^{-4}$
<i>Coscinodiscus sp.</i>	7.51	50	$1.5 \times 10^{-1}$
<i>Phaeodactylum tricorutum</i>	347.64	3,466,633	$1.0 \times 10^{-4}$

*Cochlodinium polykrikoides*와 규조류에 속하는 *Coscinodiscus sp.*가 각각  $1.6 \times 10^{-1} \mu\text{g}\cdot\text{cell}^{-1}$ 와  $1.5 \times 10^{-1} \mu\text{g}\cdot\text{cell}^{-1}$ 로 유사하게 가장 큰 값을 나타냈다.

#### 3.2 식물플랑크톤의 분류군에 따른 파장대별 광특성 비교

Fig. 4는 외편모조류에 속하는 *Gyrodinium aureolum*, *Heterocapsa triquetra*, *Prorocentrum minimum*, *Prorocentrum dentatum*, *Prorocentrum micans*, *Prorocentrum triestium*, *Scrippsiella trochoidea*(위쪽)과 녹조에 속하는 *Chlorella ellipsoidea*, *Chlamydomonas sp.*, *Chlorella schroeteri*(아래쪽)을 550 nm에서 규격화하여 비교한 비흡광 스펙트럼이다. 외편모조류에 속하는 대부분의 종들은 *Gyrodinium aureolum*만을 제외하고 모두 400-450 nm에서 완만한 형태의 흡광대, 600 nm 부근에서 가장 낮은 흡광을 나타내며 590 nm에서 약한 보조 흡광대를 나타냈다. 반면 녹조류는 430 nm 부근에서 최대값, 550 nm에서 최저 흡광대를 나타냈으며, 460 nm, 640 nm에서 흡광이 급격히 감소하는 형태를 나타냈다.

Fig. 5는 외편모조류(위쪽)와 녹조류(아래쪽)를 550 nm에서 normalization 하여 비교한 비역산란 스펙트럼이다. 외편모조류에 속하는 식물플랑크톤들은 종마다 차이는 있으나 460 nm, 580 nm, 720 nm에서 아래 방향으로 최대값이 있는 *Gyrodinium aureolum*를 제외하고는 450 nm와 670 nm 부근에서 아랫방향으로 최대값을 나타내고, 대체로 W 형태로 두 번의 굴곡이 있으며 400-700 nm 범위에서 570 nm 부근을 중심으로 대칭의 형태를 나타냈다. 또한 녹

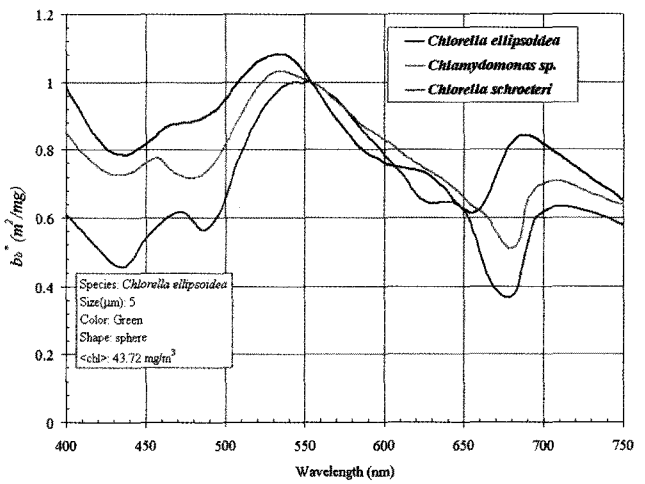
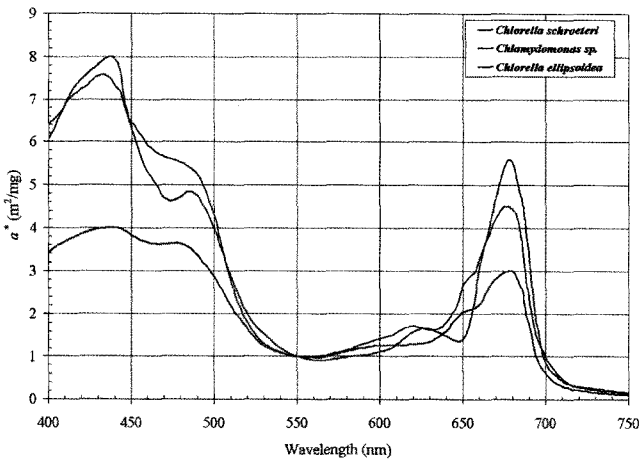
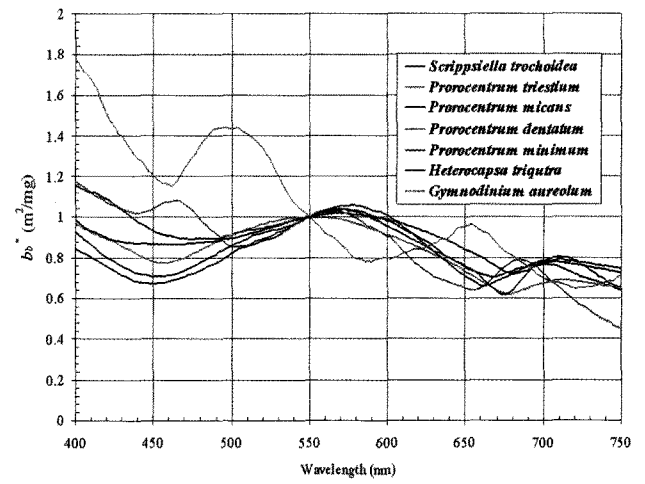
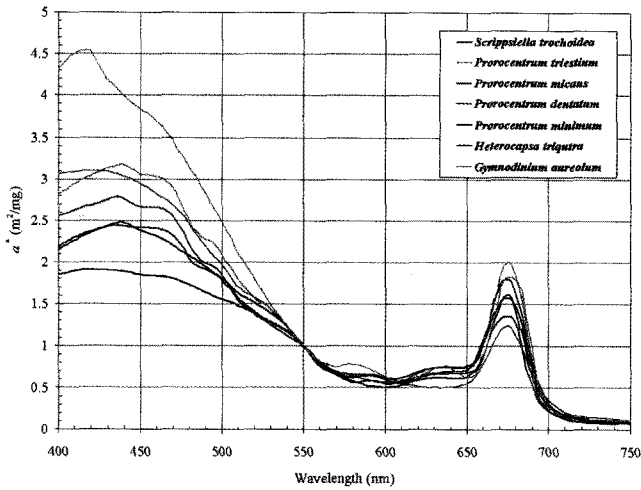


Fig. 4. Spectral values of the specific absorption coefficients ( $a^*$ ) measured on Diophyceae (left) and Chlorophyceae (right).

Fig. 5. Spectral values of the specific backscattering coefficients ( $b_b^*$ ) measured on Diophyceae (left) and Chlorophyceae (right).

조류에 속하는 종들은 440 nm, 490 nm, 680 nm에서 아래 방향의 최대값과 460-470 nm, 540 nm, 700 nm 부근에서 위 방향의 최대값을 나타냈다. 녹조류는 대체로 비역산란 스펙트럼의 형태가 비흡광 스펙트럼을 엮어 놓은 것과 유사한 형태를 보였다.

Fig. 6은 400 nm 이하의 파장대에서 비흡광계수 스펙트럼이 증가하는 추세를 보인 종은 제외하고 실험에 사용된 모든 종들의 비흡광계수 스펙트럼과 비역산란계수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 종에 따라 차이는 있으나 외편모조류, 침편모조류, 녹조류, 유글레나

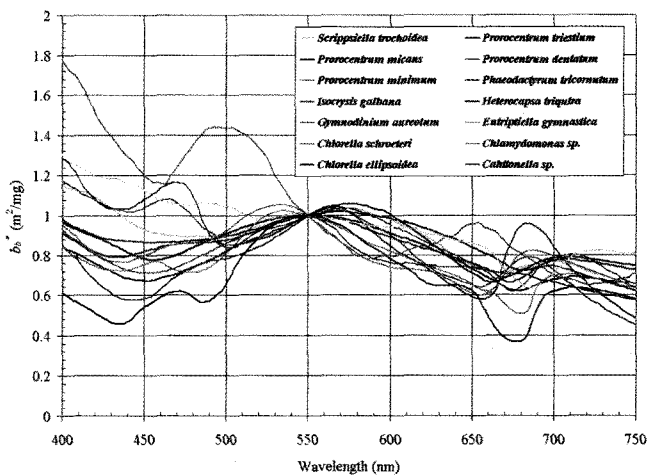
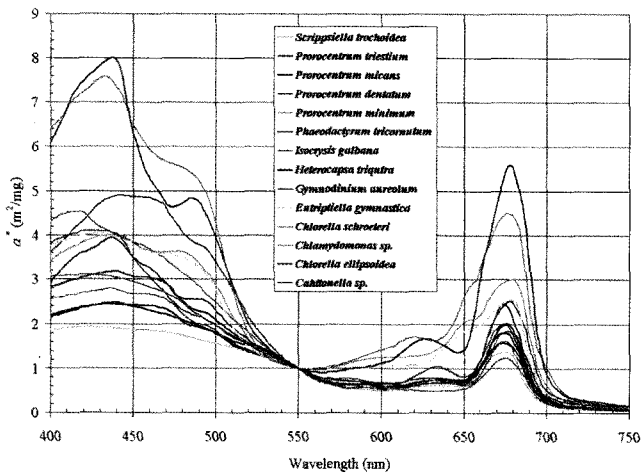


Fig. 6. Spectral values of the specific absorption coefficients ( $a^*$ ) (left) and backscattering coefficients ( $b_b^*$ ) (right) on measured all species.

류, 착편모조류, 규조류와 같이 분류군에 따라 유사한 그래프의 형태와 계수 값을 나타내는 것을 볼 수 있다.

대체적으로 비역산란계수 스펙트럼은 비흡광계수 스펙트럼과는 반대방향으로 최대값을 나타내 비흡광 스펙트럼을 뒤집어 놓은 것과 유사한 형태를 나타내며, 비역산란계수는 비흡광계수보다 10<sup>2</sup> 정도로 아주 낮은 값을 가진다. 비역산란계수 스펙트럼에서 값의 범위는 종에 따라 10<sup>2</sup>~10<sup>4</sup> mg·m<sup>-2</sup>의 범위로 약 100배의 차이를 보였다.

#### 4. 결 론

전 세계적으로 적조를 일으키고 있는 생물의 종류는 약 150종 정도로 추정되고 있으며, 우리나라에서 출현하는 식물플랑크톤 중에서 적조를 일으키는 생물은 약 40여 종으로 알려져 있다. 저온 고염인 겨울철에는 주로 규조류에 의한 적조현상이 발생되고 봄철에는 규조류와 소형 편모조류가 그리고 여름철에는 대형 편모조류가 유해적조를 일으키고 있다. 편모조류의 경우에도 초봄의 수온이 낮을 때는 *Heterocapsa triquetra* 종이 적조를 일으키며, 여름철 수온이 높을 때는 *Chocloclodium polykrikoides* 종이, 같은 수온분포에서 염분이 낮은 수역에서는 *Heterosigma akashiwo*, 수온이 높은 수역에서는 *Prorocentrum micans*와 같은 종이 적조 우점종으로 출현한다. 또한 적조는 주기적이고 광역적으로 발생하므로 선박을 이용하는 것보다 항공기 또는 위성을 이용한 모니터링이 더 효과적이다. 본 연구에서는 한국 연안에서 주로 적조를 발생시키는 종들에 대한 고유의 광특성(IOPs)을 조사함으로써 적조 원격탐사의 분석적 접근을 시도하였다.

적조 생물은 파장 440 nm와 680 nm 부근에서 공통적으로 주 흡광대가 나타났으며, 종들에 따라 460 nm, 530 nm, 590 nm 등 각각 조금씩 다른 보조 흡광대가 나타났다. 이는 식물플랑크톤의 종마다 각각 가지는 색소의 종류가 다르기 때문이며, 이러한 보조 흡광대의 차이는 식물플랑크톤 종 식별을 가능하게 한다. 흡광스펙트럼의 신호에 비해 역산란 스펙트럼의 신호는 10<sup>2</sup>로 매우 작은 값을 나타내나 이는 우리나라 적조 발생 해역과 같이 case-II의 특성을 가지는 해역에서 다른 부유물질과 적조 생물을 구분할 수 있는 중요한 특성이다.

분류군에 따라서 식별 가능한 파장 특성이 나타났는데 외편모조류의 경우 비흡광 및 비역산란 값이 다른 분류군 보다 낮게 나타났으며 굴곡의 형태도 완만하고 극값도 낮게 나타났다. 반면 녹조류의 경우는 높은 흡광계수 값과 폭은 좁은 형태의 흡광스펙트럼을 나타냈으며 비역산란계수에서는 570 nm를 중심으로 400~700 nm 범위에서 대칭되는 형태의 스펙트럼을 나타내었다.

녹조류인 *Chlamydomonas sp.*, *Chlorella ellipsoidea*, *Chlorella schroeteri*는 내부 엽록소 농도가 가장 낮고, 생체크기도 가장 작았다. 그러나 이들의 비흡광계수는 다른 종들보다 현저히 크게 나타났다. 반면, 규조류에 속하는 *Coscinodiscus sp.*는 내부 엽록소 농도가 가장 높고, 생체크기도 가장 컸으나 비

흡광계수는 가장 낮게 나타났다. 따라서 비흡광계수와 비역산란계수의 차이는 세포의 내부 엽록소 농도와 세포 크기와 반비례한다고 볼 수 있다.

이들 결과는 적조 원격탐사를 위한 해색 모델 개발에 있어 흡광 및 역산란계수의 입력 변수로 사용될 수 있으며, Hyperspectral 위성의 개발 및 활용이 활성화 되어감에 따라 적조 원격탐사 수행시 한국주변해역에 활용 가능한 IOP자료를 제공할 것이다.

#### 사 사

본 연구는 한국해양연구원 해양위성센터의 GOCI 활용연구지원사업으로 이루어 졌습니다.

#### 참고문헌

- [1] 국립수산과학원, 2000, 적조 (III), 국립수산과학원 보고서.
- [2] 국립수산과학원, 2003, National Report on HABs in Korea, 국립수산과학원 보고서.
- [3] Ahn, Y.-H., A. Bricaud and A. Morel, 1992, Light backscattering efficiency and related properties of some phytoplankters. *Deep-Sea Research*, Vol. 39, No.11/12, 1835-1855.
- [4] Bidigare, R. R., Ondrusek, M. E., Morrow, J. H., and Kiefer, D. A., 1990, In vivo absorption properties of algal pigments. *Ocean Optics X, Proc. SPIE*, 209-302.
- [5] Carder, K. L., and Steward, R. G., 1985, A remote-sensing reflectance model of a red tide dinoflagellate off West Florida. *Limnology and Oceanography*, 30, 286-298.
- [6] Ciotti, A. M., Lewis, M. R., and Cullen, J. J., 2002, Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and spectral shape of the absorption coefficient. *Limnology and Oceanography*, 47, 404-417.
- [7] Guillard, R. R. L., and J. H. Ryther, 1962. Studies of marine planktonic diatoms. 1, *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula conferebacea* (Cleve) Gran. *Can. J. Microbiol.* 8, 229-239.
- [8] Hallegraeff, G. M., D. M. Anderson and A. D. Cembella, 1995, Manual on harmful marine microalgae. UNESCO, pp.551.
- [9] Hoepffner, N., and Sathyendranath, S., 1991, Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton. *Marine Ecology. Progress Series*, 73, 11-23.
- [10] Jeffrey, S. W. and G. F. Humphrey, 1975, New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c and c in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochimie Physiologie Pflanzen*, 167, 374-384.
- [11] Kirk, J. T. O., 1986, Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- [12] Maffione, R. A. and Dona, D. R., 1997, Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters. *Applied Optics*, 36(24), 6057-6067.

- [13] Robert D. Vaillancourt, Christopher W. Brown, Robert R. L. Guillard and William M. Balch, 2004, Light backscattering properties of marine phytoplankton: relations to cell size, chemical composition and taxonomy. *Journal of plankton research*, volume 26, number 2, pages 191-212.
- [14] Sathyendranath, S., Lazzara, L., and Prieur, L., 1987, Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 32, 403-415.
- 
- 2008년 9월 8일 원고접수  
2008년 11월 10일 심사완료  
2008년 12월 2일 수정본 채택