

적조 원격탐사 기술 개발을 위한 적조생물의 광특성 연구

이누리*,**, 문정언*, 안유환*, 양찬수*, 윤홍주**

*한국해양연구원, **부경대학교

A Study on Optical Properties of Red Tide Algal Species

Nu-Ri Lee*, ** Jeong-Eon Moon·Yu-Hwan Ahn* · Chan-Su Yang* · Hong-Joo Yoon**

*Korea Ocean Research and Development Institute, ** Pukyung 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 광학적 특성(흡수, 역산란 특성)을 연구하였다. 실험실 수준에서의 적조 생물의 광특성을 조사하기 위해서 남해에서 채취된 21종의 적조 생물을 배양하고 spectrophotometer를 이용해 광합성 색소에 의한 흡수계수(absorption coefficient, a)와 역산란계수(backscattering coefficient, b_b)를 측정하였다. 또한 spectrophotometer를 이용해 측정된 흡수 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 m²/mg의 값을 가지며, b_b*의 범위는 10⁻²~10⁻⁴ m²/mg로 종간 약 100배의 차이가 있었다. 이와 같이 적조생물 종에 따라 스펙트럼의 모양과 값에서 차이를 나타냈으며 21종의 적조 생물 중에서 해색 스펙트럼으로 종간 구분이 가능한 종은 7-8종이었다. 이 결과는 해색모델 개발에 있어 입력변수로 활용될 것이다.

핵심용어 : 흡광계수, 역산란계수, 적조생물 광특성, 흡광 스펙트럼, 비역산란 스펙트럼

ABSTRACT : This research is about the optical characteristics 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 optical characteristics of them in the level of laboratory, and chlorophyll specific absorption coefficient (a*) and backscattering coefficient (b_b*) are estimated by using spectrophotometer. Absorption spectrums according to species appeared to range from 0.005 to 0.06 (m²/mg), and the shapes of spectrums were also different. The range of b_b* appeared to be 10⁻²~10⁻⁴ m²/mg, which had about 100 times differences between species, and the shape of spectrum have significant difference between species. These results will input as an ocean color model input parameter from ocean color.

KEY WORDS : Absorption coefficient, Backscattering coefficient, Optical properties of red tide, Specific absorption coefficient, Specific backscattering coefficient

1. 서 론

적조란 식물성 플랑크톤이 대량 번식하여 집적함으로써 바닷물의 색이 변하는 현상이다. 우리나라 연안의 적조 발생이 해마다 그 빈도와 발생기간이 늘어나고 있어 어업, 양식업 등의 피해가 증가하고 있는 실정이다. 이러한 피해를 줄이는 방법은 현재로는 적조 생물의 시공간적인 분포의 모니터링이 가장 중요하다고 사료된다. 현재 선박을 이용하여 적조발생 현장을 확인하고 있으나 관측 가능한 공간적 규모가 아주 제한적이며 인

력, 시간 그리고 비용절감 측면에서 비효율적이다. 따라서 적조 발생 지역을 광역적이고 주기적으로 모니터링 할 수 있는 위성 또는 항공기에 의한 기술 개발이 필요하다. 단일 종의 적조 생물종에 따라 해색이 변하는 것은 종에 따라 분광특성이 변하는 때문이다. 종의 고유 광특성으로 모델링되는 해색 모델을 이용하여 종에 따른 해색을 재현할 수 있으며 이는 역으로 해수색에 따라 종을 구분 할 수 있음을 의미한다. 적조 생물에 의한 해색 변화를 모델로 재현하기 위해서는 적조생물 종에 대한 비흡광 및 비역산란 계수의 값이 필요하다. 본 연구에서는 적조 생물의 광학적 특성을 모델의 입력변수로 활용하기 위해 해색 변화의 주요인이 되는 비흡광 계수와 비역산란 계수에 대하여 연구하고 각 종에 따른 광학적 특성을 비교하여 분류하였다.

*이누리, nrlee@kordi.re.kr, 031)400-7686
**문정언, jemoon@kordi.re.kr, 031)400-6139
**안유환, yhahn@kordi.re.kr, 031)400-5959
**양찬수, yangsc@kordi.re.kr, 031)400-7678
**윤홍주, yoonhj@kordi.re.kr, 051)620-6273

2. 재료 및 방법

2.1 적조생물 배양

실험에 사용한 시료는 남해에서 채집된 21종의 적조생물을 Pasteur-pipette 법으로 분리하여 단종 배양한 것을 사용하였으며, 배양이 완료된 배지는 바로 광학적 측정을 위하여 농도가 묽은 것은 농축하고 농도가 너무 높은 것은 희석하여 사용하였다.

2.2 Sample의 클로로필 농도

Sample의 chlorophyll 농도는 우선 sample 약 20ml을 GF/F(Glass Fiber Filter) 25mm의 filter로 거르고 90%의 아세톤에 넣어서 유리봉으로 으갠 후 냉 암소에 약 24시간 보관하였다. 혼탁한 용액으로부터 Chlorophyll 색소 용액만을 분리하기 위하여 원심분리기를 사용하지 않고 주사기에 아세톤에 녹지 않는 25mm membrane PTFE type (Model MFS-25)의 필터를 부착하여 찌꺼기를 제거하였다. 추출된 색소용액은 dual beam spectrophotometer에서 baseline correction을 한 후 400nm에서 750nm까지 scanning하여 optical density를 측정하고 Jeffrey and Humphrey(1975)의 식으로 그 농도를 분석하였다.

$$\langle Chl \rangle (mg/m^3) = \frac{C \times v}{V} \quad (Eq. 1)$$

위 식에서 $C = 11.86E_{664} - 1.54E_{647} - 0.08E_{630}$, E_λ 는 spectrophotometer로 측정된 색소의 파장에 따른 optical density, v 는 색소를 추출하기 위해 사용된 아세톤 부피(ml) 그리고 V 는 걸러낸 해수 부피(l)이다.

2.3 적조 생물의 광학적 특성

적조 생물의 흡광도와 역산란 광을 측정하기 위해 적분구가 장착된 dual beam spectrophotometer를 사용하였다(Fig. 1). 이 광학장비는 가시광선이 두 곳에서 나오는데, 일반적으로 하나는 reference용이고 다른 하나는 sample용으로 사용한다. 이는 흡광계수(a)와 소산계수(c)를 동시에 측정할 수 있으며 산란계수(b)는 직접 측정하지 않고 소산계수와 흡광계수의 차로 계산된다 (Eq. 2).

$$b = c - a \quad (Eq. 2)$$

Dual spectrophotometer의 초기화 작업으로 baseline을 측정하는데 이것은 측정하는 동안 spectrophotometer 내의 광학적 환경변화, optical cell 또는 필터의 사용에 따른 반사, 산란 등의 문제를 기본 인식시켜 default값으로 모든 변화를 "0"로 setting 하기 위한 과정이다. Baseline 측정 후, 적조 생물의 흡

광 계수를 측정하기 위해 Sample cell과 reference cell을 적분구 입구에 두고 sample에 배양된 식물성플랑크톤을 넣고 흡광도를 측정한다. 흡광계수(absorption coefficient)는 Eq. 3과 같이 계산된다. 클로로필의 비 흡광계수(a_{ph}^*)는 Eq. 4와 같다. a_{ph}^* 는 단위 chlorophyll 농도(mg/m^3)당 chlorophyll의 광 흡수 계수(m^2/mg)이며, 해색원격 탐사에서 가장 중요한 인자이다.

$$a(\lambda) = \frac{O.D_a(\lambda) \times 2.3025}{0.01} [m^{-1}] \quad (Eq. 3)$$

$$a_{ph}^* = \frac{a_{ph}(\lambda)}{\langle chl \rangle} [m^2/mg] \quad (Eq. 4)$$

산란은 다음과 같은 식(Eq. 5)으로 계산되며, 전체 산란(b)는 후방산란과 전방산란의 합이다. 후방산란은 광의 진행방향으로 $90^\circ - 180^\circ$ 범위의 산란이고, 전방산란은 $0^\circ - 90^\circ$ 에서의 산란이다.

$$b(\lambda) = b_b(\lambda) + b_f(\lambda) \quad (Eq. 5)$$

$$b_b(\lambda) = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \beta(\theta) \sin\theta d\theta$$

$$b_f(\lambda) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \beta(\theta) \sin\theta d\theta$$

$$b(\lambda) = \int_0^{\pi} \beta(\theta) \sin\theta d\theta$$

$$\beta(\theta) = \frac{dI(\theta)}{EdV} \quad (Eq. 6)$$

위 식에서 $b(\lambda)$ 는 산란(scattering), $b_f(\lambda)$ 는 전방산란(forward scattering), $b_b(\lambda)$ 는 후방산란(backscattering)이다. $\beta(\theta)$ 는 VSF(Volum Scattering Function)으로 단위 면적에 입사하는 전체 광 에너지에 대한 단위부피, 단위 각에서의 산란광 강도의 비이며 단위는 $sr^{-1}m^{-1}$ 이다.

역산란 광의 크기를 측정하기 위한 기술은 Eq. 7와 같이 angular distribution of scattered radiation (volume scattering function) $\beta(\theta)$ 을 $\pi/2$ 에서 π 공간에 대하여 측정하여 적분을 하는 방법이 있다. 그러나 부유 상태의 입자는 체적산란이므로 후방산란광을 완벽하게 측정할 수 있는 방법은 없다. 적분형 구가 부착된 spectrophotometer(Fig. 1)를 이용하여 산란광을 측정하였으나 한정된 각의 범위(약 $132-174^\circ$)에 대하여 측정하였다 (Ahn, 1990). 141도 방향에서 산란광의 세기(β_{141})가 총 역산란 계수 (b_b)와 가장 유의성이 있다고 보고 Eq. 7를 간단하게 표현하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다(Eq. 8).

$$b_b = 2\pi \int_{\pi/2}^{\pi} \beta(\theta) \sin\theta d\theta \quad (\text{Eq. 7})$$

$$b_b(\lambda) = 2\pi x \beta_{141}(\lambda) \quad (\text{Eq. 8})$$

여기서 x 는 β_{141} 을 b_b 로 바꾸어주는 전환 상수(Conversion factor)이다. Ahn et al. (1992)은 부유입자의 역산란 계수 스펙트럼을 얻기 위하여 고안한 특수한 light trap 구조의 optical cell과 적분구 사이에서 이 x 의 값이 대체로 파장에 따라 변하지 않는 상수를 가지나 아주 흡광도가 큰 입자의 경우 파장에 따라 가볍게 변할 수 있음을 이론적으로 보여주었다. 그리고 $2\pi x$ 의 값은 플랑크톤의 종에 따라 5.5 - 7 정도를 보여주고 있다. 본 연구에서도 역시 Ahn et al. (1992)의 방법을 사용하되 $2\pi x$ (GF; Geometrical factor of optical cell)의 값을 약 6으로 일정하다고 가정하고 측정 값(b_{bm})에다 GF의 값을 곱하였다. 그리고 GF는 파장에 따라 약하게 변하는 값이나 여기서는 변하지 않는다고 가정하였다.

$$b_b(\lambda) = b_{b\ m}(\lambda) \times GF \quad (\text{Eq. 9})$$

클로로필에 대한 비 역산란 계수는 다음과 같은 식으로 얻어진다(Eq. 10).

$$b_b^*(\lambda) = b_b(\lambda) / \langle chl \rangle \quad (\text{Eq. 10})$$

3. 결 과

비흡광 계수 값의 크기를 보면, 440nm에서 0.005 - 0.06mg/m²까지 다양한 값을 나타내고 있다. Fig. 2에서 보이는 것과 같이 주 흡수대는 440 - 444nm와 형광에 의한 흡수대 680nm 두 곳이며 그 외 종에 따른 부 색소대가 나타났다. 비역산란 계수 값의 범위는 종에 따라 10⁻² - 10⁻⁴ mg/m²로 종간 약 100배의 차이가 있다. 파장에 따른 차이는 주로 흡수밴드에서는 감소하고 비 흡수밴드에서는 상대적으로 크게 나타나며, 비흡광 계수에 비해 대단히 작은 값을 나타낸다. 스펙트럼은 흡수 스펙트럼을 상하로 뒤집어 놓은 것과 같은 모양을 보여준다. 440nm의 광 흡수대에서는 값이 감소하고 비 흡수대인 550nm에서는 증가한다.

21개의 종중에서 흡광 및 역산란 스펙트럼의 모양이 다른 종과 차이가 나는 종은 7종으로 Table 1에서 *로 표시된 종이다. 이들 종은 해석모델의 입력 자료로 활용 될 수 있을 것이다.

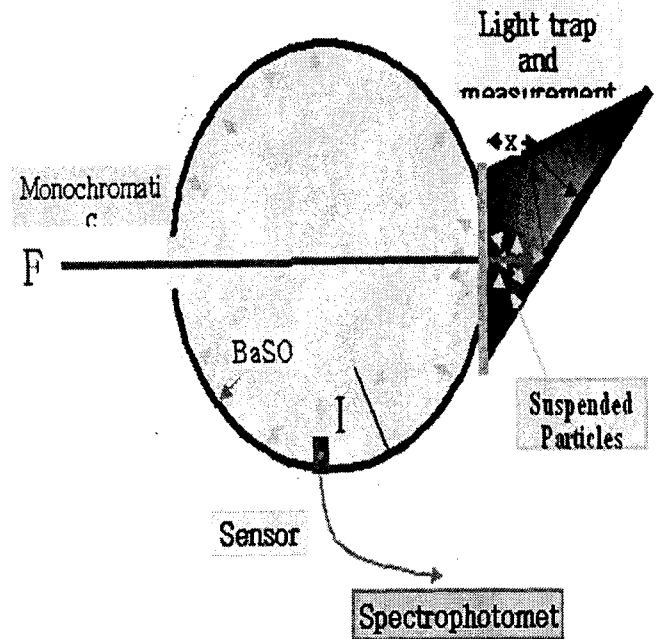
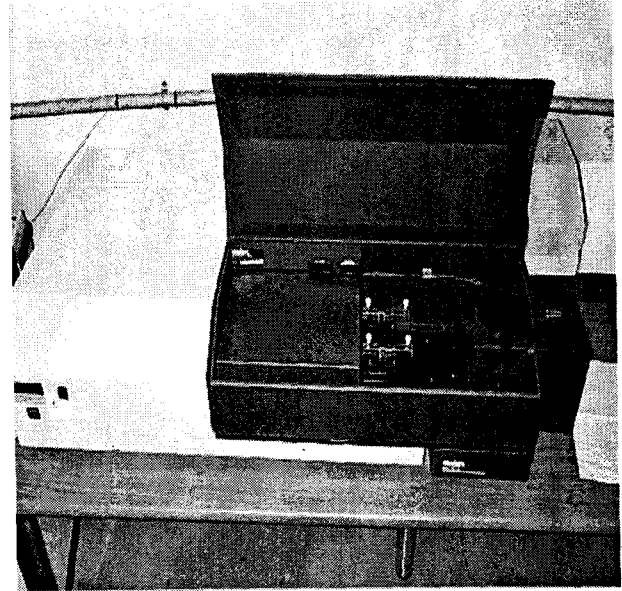


Fig. 1. Spectrophotometer equipped with Integrating Sphere for light backscattering coefficient.

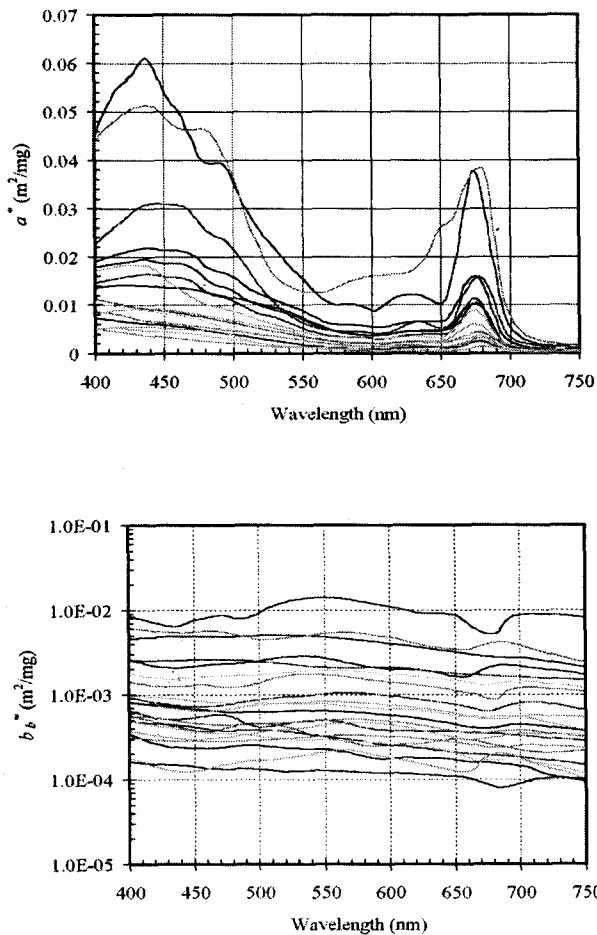


Fig. 2. Spectral value of the specific absorption coefficient (above) and specific backscattering coefficient (blow) measured on 21 algal species

4. 결론

적조 원격탐사를 위한 기초연구로서 적조 종에 따른 해색 변화를 모델링 하는데 있어서 모델의 입력 변수가 되는 적조 생물의 광학적 특성을 연구하였다. 이를 위해 남해 주변해역에서 채취된 21종의 적조 생물 종을 배양하여 이들 sample의 클로로필 농도와 광학적 특성을 조사하였다. 광학적 특성으로는 해색 변화의 주 요인이 되는 비 흡광계수(a^*)와 비 역산란계수(b_b)를 측정하였다. 비 흡광계수와 비 역산란 계수는 적조 생물 종에 따라 값과 스펙트럼의 모양에서 차이를 보였다. 가시광 영역에서 적조 생물종의 흡광 band는 주 흡광대 2개(440nm와 680nm), 광합성 보조 색소에 의한 흡광대 약 8개 정도로 구분되었다. 중간 흡광대의 구성은 상당히 큰 차이가 있었으나 같은 과에서는 상당히 유사한 흡광 스펙트럼의 모양을 나타냈다. 그러나 보조 흡광대에서 그 값의 크기에는 차이가 있었다. 남해에

Table 1. Spectral characteristics of absorption and backscattering of the 21 species

Species	광학적 특징		
	외형적 색깔	흡광도 스펙트럼 특징 파장대	역산란 스펙트럼
Dinophyceae (와편모조)			
<i>Alexandrium catenella</i>	Yellowish brown	-	장파장 쪽으로 감소
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	"	400nm 흡수 증가	평탄-감소
<i>Gymnodinium catenatum</i>	"	400nm 흡수 증가	파장감소, 굴곡
<i>Gymnodinium sanguineum</i>	"	400nm 흡수 증가	파장감소
<i>Gyrodinium sp.</i>	"	-	파장 크게 감소
<i>Gyrodinium aureolum</i>	"	575nm, 625nm	파장감소, 굴곡
<i>Gyrodinium impudicum</i>	Brown	400nm 흡수 증가	파장감소
<i>Heterocapsa triquetra</i>	Yellowish brown	460nm, 500nm	550nm hump
<i>Katodinium rotundatum</i>	"	-	
<i>Prorocentrum minimum*</i>	"	460-470nm, 490nm	550nm hump
<i>Prorocentrum micans</i>	Brown	525nm	550nm hump
<i>Prorocentrum dentatum</i>	Yellowish brown	525nm	파장감소, 굴곡, 550nm hump
<i>Prorocentrum triestium*</i>	"	470, 490, 525nm	파장감소, 굴곡, 550nm hump
<i>Serippsiella trochoidea*</i>	Red	450-550nm	파장감소, hump
Raphidophyceae (검편모조)			
<i>Chattonella sp.</i>	Golden brown	-	장파장 쪽으로 감소
Chlorophyceae (녹조)			
<i>Chlamydomonas sp.*</i>	Green	450 - 500nm, 650nm	550nm hump
<i>Chlorella ellipsoidea*</i>	Green	450 - 500nm	550nm hump
<i>Chlorella Schroeteri*</i>	Green	450 - 500nm, 650nm	550nm hump
Euclophyceae (유글레나조)			
<i>Eutripiella gymnastica</i>	Green	450 - 500nm, 650nm	파장감소
Haptophyceae (파편모조)			
<i>Isocrysis galbana*</i>	Brown	440-460nm, 490nm, 635nm	550nm hump
Bacillariophyceae (규조류)			
<i>Coscinodiscus sp.</i>	Yellowish brown	400nm 흡수 증가	파장감소
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	"	480-490nm, 630nm	550nm 약 hump

서 채취된 적조 생물 종의 비 흡광 계수는 Cell 물질의 흡광도에 비례하고 Cell의 클로로필 농도에 반비례한다. 그리고 Cell의 크기가 클수록 흡광도가 점차 감소하는 Package effect가 일어난다. 이와 반대로 역산란 계수는 기존에 연구된 종들에 비해 큰 값을 나타냈는데 이는 Cell 내부 클로로필 농도의 차이와 크기에 의해 결정된다. 역산란 스펙트럼에 있어서 cell의 크기와 흡광도의 관계가 추가적으로 연구되어야 하며, 스펙트럼의 모양이 440nm 이하 파장대에서 증가하는 것은 cell이 일부 손상당하였기 때문인 것으로 사료되나 추후 정밀한 측정이 필요하다. 21개의 종에서 흡광 스펙트럼과 역산란 스펙트럼의 모양이 다른 종과 차이가 나서 원격탐사 중 구분에 적용될 수 있는 종은 7종이었다. 이들 결과는 해석 모델의 입력변수로 활용될 수 있다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 “해양환경 관측 및 개선을 위한 기반기술 연구” 과제로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 한국해양연구원, 1998. 해양원격탐사기술 개발을 위한 해석 분석모델의 개발. 한국해양연구원 보고서, BSPE 97670-00-1075-7
- [2] 한국해양연구원, 2000. 해양환경 관측 및 개선을 위한 기반기술 연구. 한국해양연구원 보고서, BSPE 00787-00-1297-1. p.75-116.
- [3] JOHN T. O. KIRK, 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems, Cambridge
- [4] Ahn Y. H., Bricaud A. and A. Morel, 1992. Light backscattering efficiency and related properties of phytoplankters. Deep-Sea Res., vol.39, No.11/12, p.1835-1855.
- [5] Ahn Y. H., 2000. Development of Remote Sensing Reflectance and Water Leaving Radiance Models for Ocean Color Remote Sensing Technique. Journal of the Korean Society of Remote Sensing of Remote Sensing, Vol.16, No.3, p. 243-260.
- [6] David R. Dana and Robert A. maffione, HOBI Labs, Inc., Determining the backward scattering coefficient with fixed-angle backscattering sensors-revisited, Ocean Optics XVI, Santa Fe New Mexico, November 18-22, 2002.
- [7] Maffione, R.A. and Dana, D. R., 1997. Instruments and methods for measuring the backwater-scattering coefficient of ocean waters. Applied Optics, Vol.36, No.24, p.6057-6067.