



공학석사 학위논문

적조원격탐사 활용을 위한 적조생물 종 고유광특성 연구



2007년 8월

부경대학교 대학원

위성정보과학과

이 누 리

공학석사 학위논문

적조원격탐사 활용을 위한 적조생물 종 고유광특성 연구

지도교수 윤홍주

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2007년 8월

부경대학교 대학원

위성정보과학과

이 누 리

이누리의 공학석사 학위논문을 인준함.

2007년 8월 일



목 차

List of Figures	iv
List of Tables	vii
Abstract	viii
제 1 장 서론	1
제 2 장 재료 및 방법	10
2.1. 적조 생물 종 배양	10
2.2. 적조 생물 종의 엽록소 농도 측정	10
2.3. 적조 생물 종의 입자 크기와 내부 엽록소 농도 측정	14
2.4. 적조 생물 종의 흡광계수 측정	18
2.5. 적조 생물 종의 산란계수와 역산란계수 계산	21
제 3 장 결과 및 고찰	25
3.1. 적조 생물 종의 입자 크기 및 내부 엽록소 농도	25
3.2. 적조 생물 종의 파장에 따른 비 흡광계수 특성	25
3.3. 적조 생물 종의 파장에 따른 비역산란계수 특성	43
3.4. 적조 생물 종의 분류군에 따른 파장대별 광특성 비교	59
제 4 장 결론	65
참고문헌	67

List of Figures

Fig. 1. Number of observations of harmful algal bloom outbreaks off Korean coast
since 1980 2
Fig. 2. Spectral variation of absorption in seawater. Qualitative comparison of the
shapes of absorption spectra of pure water, specific absorption by
chlorophyll and CDOM (Prieur and Sathyendranath, 1981)
Fig. 3. Cause-effect chain (Morel and Bricaud, 1981)
Fig. 4. Lambda 19 dual Spectrophotometer (PERKIN-ELMER co.). 14
Fig. 5. BECKMAN Co., Coulter Multisizer TM 3 Particle Counter outside(above),
inside(below). 15
Fig. 6. Inside structure of Integrating Sphere
Fig. 7. Spectral values of the specific absorption coefficients(a [*]) measured on
Diophyceae. (A)Alexandrium catenella, (B)Cochlodinium polykrikoides,
(C)Gymnodinium catenatum, (D)Gymnodinium sanguineum, (E)Gyrodinium
sp., (F)Gyrodinium aureolum, (G)Gyrodinium impudicum, (H)Heterocapsa
triqutra, (I)Prorocentrum minimum, (J)Prorocentrum micans,
(K)Prorocentrum dentatum, (L)Prorocentrum triestium, (M)Scrippsiella
trochoidea
Fig. 8. Spectral values of the specific absorption $coefficients(a^*)$ measured on
Chattonella sp. belong to the Raphidopeaceae
Fig. 9. Spectral values of the specific absorption $coefficients(a^*)$ measured on
Chlorophyceae. (A) <i>Chlamydomonas</i> sp., (B) <i>Chlorella ellipsoidea</i> ,

Fig. 10. Spectral values of the specific absorption $coefficients(a^*)$ measured on

Eutriptiella gymnastica belong to the Euglophyceae. 40

- Fig. 12. Spectral values of the specific absorption coefficients(a^{*}) measured on Bacillariophyceae. (A) *Coscinodiscuc* sp., (B) *Phaeodacturim tricrnutum*

- Fig. 18. Spectral values of the specific backscattering coefficients(b_b*) measured on
 Bacillariophyceae. (A) Coscinodiscuc sp., (B) Phaeodacturim tricrnutum
 56

Fig. 19. Light absorption bands in the some phytoplankton (redtide algae in the

South	Sea	and	some	cultured	species	at	LPCM	in	France)	6	1
-------	-----	-----	------	----------	---------	----	------	----	--------	---	---	---

Fig. 20. Spectral values of the specific absorption $coefficients(a^*)$ measured on



List of Tables

Table 1. Maximum cell density of red tide causative organisms during 1999 -
2003
Table 2. Number of red tide events depending on the approximate suffered area
during 1999 - 2003
Table 3. The duration of red tide in Korean coastal waters from 1999 to 2003
Table 4. Fishery damage by red tide in the Korea coast 5
Table 5. Cultured phytoplankton species, strain and sampling sites 12
Table 6. Specification of Dual beam spectrophotometer 13
Table 7. Specification of Multi-sizer Coulter Counter 17
Table 8. Estimated Chlorophyll-a quantities per unit cell for the 21 species 26
Table 9. Algae appearance and cell size for the 21 species 27
Table 10. Spectral characteristics of absorption and backscattering of the 21
species
Table 11. Light absorption bands and related photosynthetic pigments of
phytoplankton

Inherent Optical Properties of phytoplankton for the application of red tide remote sensing

Nu-ri Lee

Department of Satellite Information Sciences, Graduate School Pukyong National University

Abstract

Red tide occurs every year in coastal area. Its spatial-temporal scale is getting larger and days of duration is getting longer than ever. Therefore, the economical loss of aquaculture is increasing each year. Red tide algae are estimated 150 different species all around the world, among these, 40 species are appeared in Korean coastal sea and danoflagellate is the main species which causes red tide. Remote sensing technology is conducted to detect red tide but it is still in sufficient.

Firstly, spatial resolution of ocean color satellite is 1km, as this reason, it can only detect large scale of red tide. Secondly, coastal area, which occurs red tide, is often area with high density of suspended particulate. Therefore it is difficult to recognize between red tide and suspended particles. Recently, ocean color depends on the species of red tide and it discovers that ocean color is different with different types of algae. For the research of optical properties of red tide algae, phytoplankton was cultivated, measured the absorption and backscattering coefficient properties. Based on this, differences of optical properties between red tide algae are researched. Optical property differences based on the red tide species are gained from the shape and value of spectrum. Main absorption band was 430 - 440 nm and 680 nm and accessory absorption band was shown according to other red tide species. Absorption spectrums according to species are appeared diversely from 0.005 to 0.06 m²/mg. The range of specific backscattering coefficient was 10^{-2} ~ 10^{-4} m²/mg, it showed 100 times differences according to the different species of red tide algae and spectrum shape was also quite different. It is estimated that accessory absorption band, absorption difference in the same band, backscattering spectrum shape strength difference will be the main factor for classifying the red tide species.

For more accurate remote sensing detect for red tide, optical character gained from red tide algae species are needed to store as data base, and also inverse model should be developed to analyze the species and amount of red tide from ocean color.

제1장 서론

적조(red tide) 현상이란 "해양에 서식하는 식물 플랑크톤이 일시에 다량으 로 증식되거나 또는 물리적으로 집적되어 바닷물의 색깔을 변화시키는 현상" 이다(국립수산과학원, 2000).

적조 발생은 다양한 적조 생물의 환경·생리적 특성이 원인이 된다. 일반적 으로 적조 현상이 발생하는 환경 조건은 지형적으로 외양과의 해수 교환이 적 은 폐쇄성 내만해역으로서, 육지로부터의 강우와 해저퇴적물 용출에 의하여 적조생물의 성장과 번식에 필요한 영양염류와 성장을 촉진시키는 비타민류, 철, 망간 등의 미량원소가 공급되어 바닷물 속에 풍부하게 녹아 있어야 한다. 그리고 적조생물의 광합성 활동에 필요한 일조량이 충분하고 해수의 온도가 증식에 알맞아야 하며 안정된 수괴가 형성되어야 한다.

적조생물의 생리적 특성으로 규조류(diatom)의 경우 영양염류인 규산염, 질 산염 및 인산염의 용존량이 풍부하고 일조량 등의 환경조건이 갖추어지면 최 대증식속도로 번식하여 밀도가 높아져 해수는 규조류가 갖고 있는 색소체의 색상에 따라 황갈색 또는 적갈색을 띠게 되어 적조현상이 일어난다.

반면에 편모조류(flagellate)에 의한 적조의 발생양상은 규조류와 달리 일반 적 성장제한 요인 외에 육지로부터 유입되는 비타민류, 미량금속, 특수유기물 등 증식촉진 물질의 영향을 크게 받는다. 그리고 편모조류는 운동기관으로 2~4개의 편모를 가지고 있기 때문에 이동할 수 있으며 이동 방향은 빛 또는 특수한 화학물질의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

우리나라의 적조 현상은 봄철에서 가을철까지, 특히 고수온기인 여름철에 육지로부터 영양염류와 성장을 촉진하는 물질의 유입량이 많은 곳에서 주로 발생한다.

- 1 -



Fig. 1. Number of observations of harmful algae bloom outbreaks off Korean coast since 1980.

Fig. 1은 1980년부터 2000년 기간 동안 연도별 우점군(dominant taxon)별 발생건수를 나타낸 것으로 1980년대까지는 주로 규조류에 의해 적조가 발생하 였으나, 1985년 이후에는 편모조류에 의한 적조발생건수와 점유비율이 점차 증가하였음을 보여준다(국립수산과학원, 2003).

Table 1은 한국연안에서 적조를 발생시키는 대표 종인 유해 적조 생물 Cochlodinium polykrikoides에 의해 1999~2003년 기간 동안 발생한 적조의 최대 밀도를 나타내었다. 최대 밀도는 1999년도에 43,000 cell/ml로 발생한 이후 2000년도에 15,000 cell/ml로 감소했으나 2001년과 2002년에 30,000 cell/ml 이상 으로 고밀도화 되었으며 2003년에는 최고 밀도인 48,000 cell/ml까지 증가했다. 이를 통해 과거에 비해 적조의 밀도가 해가 갈수록 고밀도화 되어 가고 있음 을 알 수 있다(국립수산과학원, 2003). Table 2는 1999~2003년 기간 동안의 적조 발생 해역 범위이다. 1999년에는 1km² 미만으로 국소적 규모의 적조 현상이 총 76건 중에서 43건을 기록하며 57%로 가장 높으나, 2003년에는 총 45건 중 20건으로 44%가 100 km² 이상의 광범위한 영역에서 적조가 발생했음을 보여준다. 2000년 이후부터 1 km² 규모 의 적조발생 영역은 줄어드는 반면, 100 km² 이상의 광역 규모의 적조발생은 증가하고 있다(국립수산과학원, 2003).

Table 1. Maximum cell density of red tide causative organisms during 1999~2003

Year	Species	Max. Cell Density (cells/ml)
1999	Cochlodinium polykrikoides	43,000
2000	Cochlodinium polykrikoides	15,000
2001	Cochlodinium polykrikoides	32,000
2002	Cochlodinium polykrikoides	30,000
2003	Cochlodinium polykrikoides	48,000

Table 2. Number of red tide events depending on the approximate suffered area during 1999~2003

X	Dimension of red tide suffered area					
Year	1 km^2	$1-100 \text{ km}^2$	>100 km ²	Total		
1999	43	13	20	76		
2000	45	16	8	69		
2001	35	12	9	56		
2002	30	10	15	59		
2003	17	8	20	45		

뿐만 아니라 적조 발생 지속기간도 과거에 비해 점차 길어지고 있음을 Table 3에서 볼 수 있다. Table 3은 1999~2003년 기간 동안 최초 적조부터 소 멸까지의 일수를 나타낸 표이다(국립수산과학원, 2003). 1999년에 54일 동안 적조가 지속된 이래 2000년에는 29일이었으나 그 후 2001년부터 2003년까지 해마다 적조현상의 지속기간이 증가함을 볼 수 있다.

Table 3. The duration of red tide in Korean coastal waters during 1999~2003

Year	1999	2000	2001	2002	2003
Days of duration	54	29	42	55	62

위의 자료에서 나타난 바와 같이 해마다 적조의 발생 범위가 광역화되고, 발생 빈도와 농도 그리고 지속일수가 증가함에 따라 관광 산업, 어업 및 양식 업 등의 경제적 피해도 증가하고 있으며 년도에 따른 경제적 손실액은 Table 4와 같다(국립수산과학원, 2003). 이러한 현상은 심각한 사회·경제적인 문제로 대두되고 있다.

적조를 모니터링하기 위해 기존에는 주로 선박을 이용해 왔으나 이는 인 력, 비용, 시간적 측면에서 비효율적일 뿐만 아니라 점점 광역화되어 발생하고 있는 적조 발생 영역을 관리하기에는 어려움이 있다. 따라서 주기적이고 광역 적으로 적조발생을 감시하고 모니터링 할 수 있는 항공기나 위성을 통한 원격 탐사를 이용하는 것이 효율적으로 판단된다.

Year	Species	Economic Loss (million dollor)
1981	Karenia mikimotoi	1.7
1992	Gyrodinium sp.	5
1993	Cochlodinium polykrikoides	7
1995	Cochlodinium polykrikoides	95
1996	Cochlodinium polykrikoides	1.8
1997	Cochlodinium polykrikoides	1.2
1998	Cochlodinium polykrikoides	0.1
1999	Cochlodinium polykrikoides	0.2
2000	Cochlodinium polykrikoides	0.2
2001	Cochlodinium polykrikoides	7
2002	Cochlodinium polykrikoides	4
2003	Cochlodinium polykrikoides	18.6

Table 4. Fishery damage by red tide in the Korea coast

적조 모니터링을 하기 위한 원격탐사기술로는 해양원격탐사의 한 분야인 해색원격탐사(Ocean color remote sensing)가 있다. 이 기술은 인공위성 또는 항 공기 등에 탑재된 센서에 의해 측정된 가시광 영역의 광에너지(radiance)를 이 용해 해수 내에 포함된 다양한 물질의 양과 종류를 알아내는 기술이다. 여기 서 이용되는 광에너지는 수중으로 입사한 태양광이 해수 밖으로 반사되어 나 오는 광에너지(water leaving radiance)이다. 해수특성에 따라 수색이 변하게 되 는데 이는 곧 빛을 반사시키는 해수 중 물질들에 따른 광특성의 차이로 나타 나는 현상으로 이러한 예는 Fig. 2에서 볼 수 있다. 실선은 식물플랑크톤 엽록 소(Chlorophyll)에 의한 비 흡광계수, 점선은 CDOM에 의한 흡광계수이며, 쇄선 은 순수한 물에 의한 흡광계수를 나타낸다. 이렇듯 흡광 스펙트럼의 값과 모 양이 물질들의 종류에 따라 다르다는 사실을 알 수 있다.



Fig. 2. Spectral variation of absorption in seawater. Qualitative comparison of the shapes of absorption spectra of pure water, specific absorption by chlorophyll and CDOM (Prieur and Sathyendranath, 1981).

Fig. 3에서는 광특성을 고유 광학적 특성(Inherent Optical Properties, IOP)과 외형적 광특성(Apparent Optical Properties, AOP)으로 분류하고, AOP는 IOP와 관측시의 태양의 위치, 해수 표면의 상태 등과 같은 광학적 상황 등에 의해 결정됨을 보여 준다.

IOP란 주어진 해수의 고유 광특성으로 외부의 광학적 상황에 관계없이 일 정한 값을 가지는 특성이며 현장관측이 어려워 주로 실험실 내에서 측정된다. IOP항목으로는 흡수계수(absorption coeff., a), 감쇠계수(attenuation coeff., c), 역 산란계수(backscattering coeff., b_b)가 있다. AOP는 현장 관측을 통해 얻어지며 태양의 고도 및 위치, 날씨, 해양의 상태 등 현장의 환경에 따라 다르게 측정 된다. AOP 항목으로는 K_d, 원격반사도(Remote Sensing Reflectance; R_{rs}), Water Leaving Radiance(L_w), Downwelling irradiance(E_d), Upwelling irradiance(E_u) 등이 있다. 원격탐사를 이용한 적조 예측으로는 적조의 발생 범위와 적조 띠의 이동, 확산 경로 등을 지구관측위성의 가시영역 밴드와 적외선 밴드 감지기를 통해 실시간으로 파악함으로써 적조예찰 및 예측을 위한 자료로 활용하는 기술과 적조 생물의 IOP를 통해 해색을 모델링하여 해수 색으로부터 적조의 농도와 종을 추정하는 분석적 기술에 대한 연구가 국내외에서 수행되고 있다.



Fig. 3. Cause-effect chain (Morel and Bricaud, 1981).

적조 원격탐사 전문 알고리즘의 개발 시도는 1985년 Cader and Steward에 의하여 처음 시도되었다. 이들은 플로리다 연안에 발생한 Dinoflagellate bloom 을 중심으로 헬기에 Spectro-radiometer를 사용하여 Remote reflectance를 측정한 후 모델에 의하여 적조생물의 농도를 구하였다. 그러나 이 연구에서는 다양한 적조생물에 대한 연구가 아니라 오직 한 종에 대해서만 모델링함으로써 다양 하고 일반적인 환경에서 사용할 수 없고 적조생물의 광학적인 특성이 전혀 규 명되지 않았다는 문제점이 있다.

적조 원격탐사의 분석적 접근을 위해 식물플랑크톤의 흡광스펙트럼에 관

한 많은 연구가 수행되었다. 이 연구에서 식물플랑크톤의 홉광스펙트럼의 크 기와 모양이 변한다는 사실을 현장관측을 통해 밝혀냈으며(Ciotti *et al.*, 2002; Hoepffner and Sathyendranath, 1991; Kirk, 1986; Sathyendranath *et al.*, 1987), 이 는 식물플랑크톤이 가진 색소(Bidigare *et al.*, 1990; Hoeffner and Sathyendanath 1991; Sathyendanath *et al.*, 1987)나 셀의 크기(Ciotti *et al.*, 2002)에 따라 다르게 나타난다는 사실이 알려졌다. 역산란 계수는 홉광계수에 비해 아주 작은 값을 가지며, 홉광계수와 함께 다른 물질과 식물플랑크톤을 구분할 수 있는 중요한 광특성이다(Robert *et al.*, 2004; Ahn *et al.*, 1992).

해수를 해양광학적으로 분류할 때 "CASE-I water"와 "CASE-II water"로 구 분한다(Morel and Prieur, 1977; Gordon and Morel, 1983). CASE-I water는 대양 (open ocean)과 같은 맑은 해수를 말하며 해수의 광특성이 해수 수괴나 식물플 랑크톤(Phytoplankton)과 유기성 쇄설물, 동물플랑크톤(Zooplankton)의 섭식에 의 하 부산물, 조류세포들의 자연부패 등에 의해서 결정된다. CASE-II water는 연 안해역의 해수(coastal water)와 같이 탁한 해수로, 높은 생산력을 갖고 있으며 해수의 광특성이 부유무기 입자, 비색소 생물 입자, 용존 유기물 등에 의해 결 정된다. 우리나라 주변 해역을 구분하자면, 황해는 해양광학적인 측면에서 전 형적인 CASE-II water 환경이며, 동해는 해양학적으로 대양의 성격을 많이 가 지고 있어 해양광학적으로 대양과 유사한 CASE-I water로 분류된다. 그리고 한반도 남해(제주해협 포함)는 동중국해와 유사하게 해양광학적으로 제주해협 은 CASE-I water, 남해연안은 CASE-II water가 공존하는 해역이다. 더욱이 CASE-I water의 특성을 가지는 해역에서는 역산란 특성을 무시해도 문제되지 않으나 우리나라 해역과 같이 복잡한 CASE-II water 특성을 나타내는 해역에 서는 역산란 특성을 고려하지 않을 수 없다. 따라서 식물플랑크톤의 흡광 스 펙트럼과 함께 역산란 스펙트럼에 관하 연구가 함께 이루어져야 하다.

국내에서 원격탐사를 이용한 적조 연구로는 다음과 같은 연구들이 수행되

었다. NOAA위성의 AVHRR 센서로 실시간 관측하 적외선 자료를 이용하여 적조 발생 해역의 수온분포와 적조 분포 양상의 관계성에 관한 연구가 있으며 (Suh et al., 2000), 적수온대, 냉수대, 해양 요소의 연직 성층구조, 해류속도 및 경로, 태풍 등과 같은 시공간적으로 중규모적 해양환경 변동 양상과 적조의 발생 해역 및 발생시기, 적조의 분포 및 이동속도, 지속기간 등간의 관련성에 관한 연구가 수행된 바 있다(Suh et al., 2003; Suh et al., 2004). 그리고 적조 다발지역인 하국 남해중부해역을 대상으로 수온과 염분, 클로로필과 부유물질 및 영양염류와 같은 해양인자와 적조 발생의 상관관계에 대한 연구를 통해 적 조발생가능지역 예측하는 연구가 수행되었다(윤홍주 외, 2000). 또한, SeaWiFS 해색영상으로부터 추정된 클로로필 데이터와 고해상도 Landsat 7 ETM+ 영상 을 이용하여 영상 강조 및 분류 기법을 적용함으로써 서로 다른 광특성을 가 지는 해수에서의 적조생물의 증식특성에 관하여 연구하였다(Ahn et al., 2006). 그러나 해수 중에는 부유물질, 용존유기물 그리고 박테리아와 같은 종속영양 체(heterotrophic) 등 해색에 영향을 주는 여러 성분들이 포함되어 있어 적조가 아닌 해역이 적조와 같이 보이는 경우가 있어 chlorophyll-a의 농도로만으로는 순수한 적조를 구별하기에는 어려움이 있다. 따라서 적조 유발에 직접적인 영 향을 주는 식물플랑크톤에 대한 광특성이 규명되어야 하나, 본 연구에서 시도 하고자 하는 해수 광학적 특성에 의해 적조를 예측하는 분석적 기술에 관하 연구는 거의 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 적조생물 종을 구분하는데 있어 원격탐사를 활용하 기 위한 기초 연구로서 한반도 주변해역에서 적조를 유발하는 식물플랑크톤에 대한 고유 광특성을 분석하는데 그 목적이 있다.

제 2 장 연구 재료 및 방법

2.1 식물플랑크톤 종 배양

실험에 사용한 적조생물 종은 한국 주변 해역에서 채집된 21종의 식물플 랑크톤이며, 식물플랑크톤 분류군에 따라 와편모조류 13종, 침편모조류 1종, 녹조류 3종, 유글레나류 1종, 착편모조류 1종, 그리고 규조류 2종을 실험에 사 용하였다(Table 5). 이들을 Pasteur-pipette법으로 분리하여 순수 배양하였으며 (Hallegraeff, 1995), 배양조건은 온도 20±1℃, 광도 70 µ mol/m²/s, 광주기 14h Light : 10h Dark로 일정하게 유지하여 종에 따라 2 - 3 주간 배양하였다. 배양 에 사용된 배지는 0.2 µm의 Millipore로 2번 거른 후 멸균한 해수에 실리케이 트(Si)가 첨가되지 않은 f/2 솔루션(Guillard and Rhther, 1962)을 첨가하여 사용 하였고, 규조류에는 실리케이트를 첨가한 배지를 사용하였다.

배양이 완료된 배지는 광학적 특성 측정 시 각 항목에 적절한 농도로 조 절하여 사용하였는데 농도가 높은 것은 희석하고 묽은 것은 농축하여 사용하 였다. 입자크기 분포와 흡광계수 측정 시에는 묽은 샘플을 사용하였고 역산란 계수는 신호가 매우 약하므로 고농도의 샘플을 사용하였다. 농도를 묽히기 위 해서 멸균된 해수를 샘플에 희석하였고, 농축에는 중력을 이용하여 필터로 걸 러내는 방법을 사용하였다.

2.2 적조 생물 종의 엽록소 농도

적조 생물의 엽록소 농도를 측정하기 위해 준비된 샘플을 아세톤(aceton) 에 녹지 않는 GF/F(Glass Fiber Filter) 25 mm를 이용하여 필터가 착색될 때까 지 여과하였다. 여과된 필터는 색소 추출을 위해 20 ml vial 용기에 10 ml 아 세톤과 담아 빛이 차단되게 은박지로 싸서 5℃ 냉장고에 24시간 동안 보관하 였다. 추출된 색소에서 색소 용액만을 걸러내기 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 Spectrophotometer(Fig. 4)를 이용해 엽록소 농도를 측정하였다.

장비의 특징은 Table 6과 같다. 이 장비는 광선이 두 곳에서 나란히 나오 는 dual beam 방식이며 한쪽은 reference, 다른 하나는 target용으로 사용된다. 샘플 측정 전에 기기 내 광학적 환경을 인식시키는 초기화 작업을 하게 되는 데, 이를 baseline 측정이라 한다. baseline 측정의 목적은 측정하는 동안 optical cell 또는 필터의 사용에 따른 반사, 산란 등과 같은 spectrophotometer 내의 광 학적 환경변화를 인식시키기 위한 과정이며, reference와 target에 색소 추출에 사용한 것과 동일한 아세톤을 optical cell에 넣고 측정한다. baseline 측정 후, target에 측정하고자하는 샘플을 넣은 optical cell을 넣고 홉광도(Optical Density, O.D)를 측정한 다음 Jeffrey and Humprey(1975)의 식을 이용하여 농도를 계산 하였다(Eq. 1). 엽록소 농도를 간단히 *<cht*>라고 나타내며, 단위는 mg/m³이다.

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

여기서 , $C = 11.85 E_{664} - 1.54 E_{647} - 0.08 E_{630}$

E_λ: spectrophotometer를 이용해 측정된 색소의 파장별 O.D *v*: 색소 추출을 위해 사용된 아세톤의 부피, ml *V*: 여과한 해수의 부피, L

Species	Strain	Sampling site	Date
Dinophyceae	1		
Alexandrium catenella	AxCt_K01	Nanpo, Jinhae	1994. 4
Cochlodinium polykrikoides	CcPk _K04	Narodo, Goheung	1999. 8
Gymnodinium catenatum	GnCt_K 01	Nanpo, Jinhae	1999. 8
Gymnodinium sanguineum	GnSg_K 01	Jangmok Bay, Geoje	1998. 9
Gyrodinium sp.	Gnsp_K01	Jangmok Bay, Geoje	2000. 6
Gyrodinium aureolum	GrAr_K01	Chilcheondo, Geoje	1999. 9
Gyrodinium impudicum	GrIp_ K02	Haje, Kunsan	1998. 8
Heterocapsa triqutra	HtTq_K01	Jangmok Bay, Geoje	1999. 3
Prorocentrum minimum	PrMn_K01	Haje, Kunsan	1998. 8
Prorocentrum micans	PrMc_K01	Haje, Kunsan	1998. 8
Prorocentrum dentatum	PrDt_K01	Jangmok Bay, Geoje	1999. 7
Prorocentrum triestium	PrTe_K01	Jangmok Bay, Geoje	1999. 6
Serippsiella trochoidea	SpTc_K01	Haje, Kunsan	1998. 8
Raphidopeaceae			
Chattonella sp.	Ctsp_K01	Jangmok Bay, Geoje	1999. 9
Chlorophyceae	21	ot W	
Chlamydomonas sp.	Clsp_K01	-	1997. 6
Chlorella ellipsoidea	KMCC C_20	Japen	
Chlorella schroeteri	KMCC C_22	Nacdong	2000. 3
Euglenophyceae			
Eutriptiella gymnastica	EtGn_K01	Nanpo, Jinhae	
Haptophyceae			
Isocrysis galbana	KMCC H-2	DE-5	2000. 3
Bacillariophyceae			
Coscinodiscus sp.	Cssp_K01	Jangmok Bay, Geoje	2000. 6
Phaeodactyrum tricornutum	KMCC B-46	Japan	

Table 5. Cultured phytoplankton species, strain and sampling sites

General							
Principal	dual beam spectrophotometer						
	S All reflecting system.						
	§ Holographic gratings with 1440 lines/mm for the UV and						
Optics: UV	VIS ranges.						
version	§ Programmed optical filters with automatic filter change						
	during monochromator slewing.						
	§ 100 nm beam separation in sample compartment.						
	S Prealigned deuterium lamp for the UV range						
	S Prealigned tungsten-halogen lamp for the VIS and NIR						
Sources	ranges						
	S Automatic source change during monochromator slewing						
	S Automatic source change during monochromator siewing.						
10	S Side window photomultiplier for the UV and VIS ranges						
Detector	S Automatic detector change during monochromator slewing						
15	S Automate detector change during monochromator stewing.						
Dunsing	Facilities are provided for purging the instrument with an						
Purging	inert gas.						
	Abscissa						
Total usable							
wavelength	175-900 nm						
range	34						
	UV: 185 nm to source change wavelength (selectable in						
Partial spectral	range 300-340 nm; default wavelength 319.2 nm)						
ranges	VIS: From source change wavelength to detector change						
Tunges	wavelength (selectable in range 819.2-9.2.4 nm; default						
	wavelength 860.8 nm)						
Abscissa	±0.15 nm (UV/VIS range)						
accuracy	Potton than 0.02 nm (UV/VIS range)						
AUSCISSA	Better than 0.02 find $(0 \sqrt{3} \text{ range})$;						
repeatability	Standard deviation for 10 measurements.						
Resolution	VIS reproc						
	vis ranges.						

Table 6. Specification of Dual beam spectrophotometer



Fig. 4. Lambda 19 dual Spectrophotometer (PERKIN-ELMER co.) (left) equipped with Integrating Sphere(right black part).

2.3 적조 생물 종의 입자 크기 및 내부 엽록소 농도 측정

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

내부 엽록소 농도를 계산하기 위해 샘플의 단위 부피당 엽록소 농도 (µg/ml)와 입자수(cells/ml)를 측정하였다. 엽록소 농도는 앞서 spectrophotometer 를 이용해 측정된 값을 이용하였으며, 샘플의 입자수를 측정하기 위해 전기적 입자계수기인 Multi-sizer Coulter Counter를 이용하였다(Fig. 5).



Fig. 5. Coulter MultisizerTM3 Particle Counter outside(above), inside(below).

Coulter Counter의 측정원리는 전기저항법이며, Aperture tube라는 작은 구멍 이 있는 유리관 내부와 외부에 각각 1개의 전극이 있고 전해질을 통해 전류가 흐르게 된다. 이때 전류는 유리관에 있는 작은 구멍을 통해서만 흐르게 된다. 전해질에 분산되어있는 입자가 이 구멍을 통과하게 되면 순간적으로 저항의 변화가 생기게 되는데 이 저항은 입자의 크기(부피)가 클수록 커진다. 저항의 변화는 곧 전압의 변화이며 이 전압의 변화는 펄스로서 나타나게 된다. 이 펄 스의 개수와 크기를 통해 입자의 개수와 크기를 측정할 수 있다.

이 기기는 입자의 부피를 기준으로 환산된 크기를 구하기 때문에 입자의 모양에 상관없이 같은 부피를 가지면 항상 일정한 크기로 측정할 수 있다. 또 빛을 이용하지 않기 때문에 입자의 광학적 특성에 영향을 받지 않으며, 입자 의 절대 개수를 측정할 수 있는 장점이 있다. 기기의 특징은 Table 7과 같다.

입자크기 분포 측정시 측정 샘플 양은 100 메으로 하고 분석 부피는 50 메로 설정하였고, Aperture tube의 크기는 입자 크기를 고려하여 100 µm로 셋 팅하였다. 또한 이 기기는 최대 300 channel 까지 측정할 수 있으나 본 연구에 서는 계산의 간소화를 위해 2~60 µm 범위의 입자를 100개의 channel로 나누어 측정하였다.

내부 엽록소 농도는 측정된 엽록소 농도를 단위 부피당 입자의 수(cell density)로 나눈 것이며 단위는 μg/cell이다.

Height	45 cm (17.75 in)				
Linearity	Linear response ±1 % of pulse height over selected range				
Number of Channels	Up to 300 for any selected range				
Width	43 cm (17 in)				
Dynamic Range of Aperture	30:1 by diameter, 27,000:1 by volume				
Interface	TCP/IP to IBM compatible PC, running Win95, 98, 2000, NT 4.0				
Resolution	User Selectable				
Power Consumption	Less than 250 W				
Metering System	Mercury-free, wide range metering pump				
Overall Analysis Range	0.4 µL to 1200 µL diameter				
Aperture Tube Analysis Range	2% to 60% of aperture size, from 20 μm to 2000 μm				
Regulatory Compliance	Software is 21 CFR Part 11 Compliant				
Metered Sample Volume	Continuously selectable from 50 μ L to 2000 μ L				
Volumetric Pump Accuracy	> 99.5 %				
Depth	63.5 cm (25 in)				
Power Requirements	100 to 120 VAC \pm 10 %, 220 to 240 VAC \pm 10 %, 50/60 Hz				
Weight	34 kg (75 lb)				

Table 7. Specification of Multi-sizer Coulter Counter

2.4 적조 생물 종의 흡광계수 (a, absorption coefficient)

흡광계수(a, absorption coefficient)란 매질을 투과하는 광속(flux)에 의하여 단위 거리당 흡수되는 광 에너지의 크기이며, 흡광도를 측정하기 위해서는 filter technique를 이용한 방법과 부유 상태로 측정하는 방법을 이용한다.

Filter technique는 해수 입자를 필터가 착색될 때까지 샘플을 여과시킨 후 착색된 필터를 광 측정 기기인 spectrophotometer 내부의 광전판 앞에 부착하고 Optical Density(O.D)값을 측정하는 방법이다. filter technique를 이용한 방법의 특징은 S/N 값이 우수한 안정된 신호를 얻을 수 있다는 것이다. 하지만 filter 와 입자간의 상호작용에 의한 multiple absorption 효과(β effect)로 인해 홉광도 가 부유 상태로 측정할 때보다 약 2배 이상 높게 측정된다. 따라서 filter technique를 이용하여 측정한 홉광도 값은 별도의 보정이 필요하다.

또 다른 방법으로는 부유 상태로 측정하는 방법이다. 샘플을 Optical Cell 에 담아 spectrophotometer를 이용하여 흡광도를 측정한다. 부유 상태로 측정할 때의 문제점은 샘플의 농도가 충분치 않으면 안정적인 신호를 얻을 수 없다는 것이다. 또한 광 산란에 의한 에너지의 일부를 센서가 모두 회수하지 못하기 때문에 실제 흡수된 광량보다 크게 흡수된 것처럼 나타난다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 sample cell을 적분구(integrating sphere) 내에 넣어서 측정하는 방법과 sample cell을 최대한 광센서에 가까이 두고 측정하여 산란광 을 회수하는 방법이 있다. 현재는 적분구를 사용하는 방법은 비용이 비싸고 다루기 어려운 문제가 있어 sample cell을 광센서 가까이 두고 측정하는 방법 이 일반적으로 이용되는 방법이다.

본 연구에서는 부유 상태로 흡광도를 측정하였으며 산란광을 회수하기 위 해 sample cell을 광센서 바로 앞에 두고 측정하였다. baseline 측정에 사용된 샘플은 적조생물 배양에 사용된 배지와 동일한 것을 사용하였다. baseline 측정 이 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 nm간격으로 측정하였다. 이렇게 측정된 흡광 도는 spectrophotometer에 의해 측정된 기계적인 값으로 다음 (Eq. 2)과 같이 정 의된다.

$$O.D = \log_{10} \frac{1}{T} \tag{Eq. 2}$$

$$T = I/I_0 \tag{Eq. 3}$$

여기서 T는 투과도(Transmittance)로 초기 입사광량 (I₀)과 투과된 후의 광 량 (I)의 비의 값 (I/I₀)이다(Eq. 3). 측정이론은 매질을 투과하는 광량은 매질의 두께에 대해 지수함수 적으로 감소한다는 Beer Lambert 법칙에 의해 다음과 같이 계산된다(Eq. 4).

$$I = I_0^{-ax}$$
 (Eq. 4)

spectrophotometer로 측정된 홉광도는 샘플의 광학적 두께(optical thickness) 에 좌우되는 상대적인 값이므로, 광 흡수 계수(absorption coefficient, a)로 계산 하였다. *x*는 광이 투과한 거리로 매질의 광학적 두께(optical thickness)이다. 여 기서 Eq. 4를 변형하여 자연로그 ln을 취하면;

여기서 a는 흡수계수(absorption coefficient)이며, x는 광이 투과한 거리이다.

$$a = \frac{\ln (I_0 / I)}{x}$$
(Eq. 5)

Eq. 3과 Eq. 5에 의해,

$$a = \frac{\ln\left(1/T\right)}{x} \tag{Eq. 6}$$

$$a = \frac{2.3025 \, Log(1/T)}{x} \tag{Eq. 7}$$

여기서, 2.3025는 자연로그를 상용로그로 변환해주는 상수이며, (Eq. 2)에 의해 흡수계수(a)는 다음 (Eq. 8)과 같이 계산된다. 여기서 흡광도는 기기측정 값이며 단위는 m⁻¹이다.

a

$$=\frac{2.3025\,O.D}{x}$$

(Eq. 8)

본 연구에서는 흡광도 측정시 1 cm optical cell을 사용하였으므로 x값은 0.01로 두었다. 배양된 샘플의 농도의 영향을 받지 않는 적조생물이 가진 고유 광특성을 알아보기 위해 측정된 흡광도로부터 계산된 흡광계수는 단위 농도당 흡광계수인 비 흡광계수(Specific absorption coefficient, a^{*})로 나타났다(Eq. 9).

$$a^*(\lambda) = a(\lambda) / \langle chl \rangle$$
 (Eq. 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(λ)에 따른 광 산란계수는 측정 할 수 없기 때문에 광의 흡수와 산란의 합인 소산계수(c, attenuation coefficient) 와 흡광계수(a, absorption coefficient)를 측정하여 그들의 차로 계산한다(Eq. 10).

$$b(\lambda) = c(\lambda) - a(\lambda)$$
 (Eq. 10)

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

$$b_f(\lambda) = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \beta(\theta) \sin \theta \ d\theta$$
 (Eq. 11)

$$b_b(\lambda) = 2\pi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\pi} \beta(\theta) \sin \theta \ d\theta$$
 (Eq. 12)

$$b(\lambda) = 2\pi \int_{0}^{\pi} \beta(\theta) \sin \theta \, d\theta \qquad (\text{Eq. 13})$$

β(θ)는 단위 부피(m³)에 대해 0°~180° 범위의 매 각에 입사하는 irradiance(unit, W/m²)에 대한 산란 광(W/sr) 강도의 비이다(Eq. 14).

$$\beta(\theta) = \frac{dI(\theta)}{E \, dV}, \, m^{-1} s r^{-1} \tag{Eq. 14}$$

역산란 계수는 angular distribution scattered radiation(volume scattering function, VSF)인 β(θ)을 π/2에서 π 범위까지 적분함으로써 구할 수 있다. 그러나 측정 기기가 자동화 되지 않아 π/2에서 π 범위를 매 1° 마다 수동으 로 측정해야 하므로 실질적으로는 불가능 하다고 할 수 있다.

또 다른 측정 방법으로는 적분구가 부착된 spectrophotometer를 사용하여 측정하는 방법이 있는데 광학적 구조상 역산란 전체 각에 대한 측정은 불가능 하며 132°~174° 범위 내에서만 역산란 광을 받을 수 있다. 따라서 Mie theory 에 따라서 결손 각에 대한 산란 광량이 보상되어야 한다.

부유상태의 입자 산란은 체적산란(volume scattering)으로 후방으로 산란하 는 광을 100% 회수할 수 있는 광학적인 구조가 현재로서는 불가능하기 때문 에 입자에 의한 역산란 계수(b_b)를 spectrophotometer로 측정할 수 있는 완전한 방법은 아직 없다.

본 연구에서는 Maffione and Dana (1997)의 방법에서 제시한 결과에 따라 141° 방향에서의 산란광의 세기(β₁₄₁)가 총 역산란 계수와 가장 유의성이 있다 고 가정하고 Eq. 15와 같이 계산하였다.

$$\mathbf{b}_{\mathbf{b}}(\lambda) = 2\pi x \beta_{I4I}(\lambda) \qquad (\text{Eq. 15})$$

결손 각에 대한 보상을 위한 기하학적 보정상수인 GF(geometric factor of optical cell)은 b_b와 b_{bp}의 비의 값으로 (Eq. 16)와 같다. 여기서, b_{bp}는 결손에 해당하는 부분 역산란 광이다.

$$GF = b_b / b_{bp}$$
 (Eq. 16)

2mx의 값은 GF로 식물플랑크톤의 종에 따라 5.5~7의 값을 나타내나 본 연구에서는 6으로 일정하다고 가정하였다. 따라서 측정된 역산란 계수는 다음 과 같이 계산된다(Eq. 17).

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

여기서 bbm은 측정된 부분 역산란 계수이며, GF 값은 optical cell에 의한 기하학적 보정상수로 6을 사용하였다. 이렇게 계산된 역산란 계수는 비 홉광 계수와 마찬가지로 단위 농도당 역산란 계수인 비역산란 계수(Specific backscattering coefficient, bb^{*})로 나타내었다. 역산란 계수 측정에 사용된 기기는 적분구가 부착된 spectrophotometer로 홉광계수 측정시 사용한 기기와 동일한 것이다.

적분구의 내부 구조는 Fig. 6과 같으며 부유 상태의 입자성 물질에 의해 역산란되는 광을 측정하는데 사용된다.



제 3 장 결과 및 고찰

3.1. 적조 생물 종의 입자 크기 및 내부 엽록소 농도

Table 8은 실험에 사용된 21종의 적조 생물에 대한 단위 cell 당 엽록소 양 을 계산한 표이다. 21종의 내부 엽록소 농도는 1.6×10⁻¹ ~ 4.4×10⁻⁶ μg/cell의 범 위이며, 분류군 중에서는 녹조류가 내부 엽록소 농도가 가장 낮았으며 그 중 에서도 *Chlorella ellipsoidea*가 4.4×10⁻⁶ μg/cell로 가장 낮은 값을 나타내었다. 또한 와편모조류에 속하는 *Cochlodinium polykrikoides*와 규조류에 속하는 *Coscinodiscus* sp.가 각각 1.6×10⁻¹ μg/cell과 1.5×10⁻¹ μg/cell로 유사하게 가장 큰 값을 나타냈다.

Table 9는 21종의 적조 생물을 현미경으로 Cell의 생체 색깔, 크기 및 형태 를 관찰한 것이다. Cell은 모두 5~200 µm의 범위로 미세플랑크톤(nanoplankton) 또는 소형플랑크톤(microplankton)에 속하는 크기이다. 색깔은 황갈색, 갈색, 붉 은 색, 녹색 등으로 관찰되었으며, 형태 역시 구형, 타원형, 오각형, 막대형, 원 형 등으로 다양했다. Cell의 크기가 가장 큰 종은 규조류에 속하는 *Coscinodiscus* sp.로 그 크기가 100~200 µm이었다. 21종의 적조 생물 중에서 녹 조류에 속하는 *Chlamydomonas* sp., *Chlorella ellipsoidea, Chlorella schroeteri*와 착편모조류에 속하는 *Isocrysis galbana*는 그 크기가 5 µm로 가장 작았다.

3.2. 식물플랑크톤의 파장에 따른 비 흡광계수 (a^{*}) 특성

Fig. 6은 본 연구에서 사용된 21종의 적조 생물 중에서 와편모조류 (Diophyceae)에 속하는 식물플랑크톤의 비 흡광계수 스펙트럼이다. 가로축은 400~700 nm로 가시광 영역의 파장대이고, 세로축은 비 흡광계수로 단위는 m²/mg이다.
а ·	< Chl >	Cell Density	<chl> / [Cell Density]</chl>
Species	(µg/ml)	(cells/ml)	(µg/cell)
Alexandrium catenella	92.62	4,430	2.1 x 10 ⁻²
Cochlodinium polykrikoides	371.29	2,290	1.6 x 10 ⁻¹
Gymnodinium catenatum	17.15	432	4.0×10^{-2}
Gymnodinium sanguineum	67.09	1,450	4.6 x 10 ⁻²
Gyrodinium sp.	83.32	28,800	2.9×10^{-3}
Gyrodinium aureolum	11.64	830	1.4×10^{-2}
Gyrodinium imputicum	63.08	1,600	3.9×10^{-2}
Heterocapsa triquetra	226.03	29,500	7.7×10^{-3}
Prorocentrum minimum	154.76	35,970	4.3×10^{-3}
Prorocentrum micans	175.64	4,540	3.9×10^{-2}
Prorocentrum dentatum	4.68	31,430	1.5×10^{-4}
Prorocentrum triestium	102.80	24,470	4.2×10^{-3}
Scrippsiella trochoidea	105.98	6,120	1.7×10^{-2}
Chattonella sp.	121.95	2,930	4.2×10^{-2}
Chlamydomonas sp.	196.04	294,927	6.6 x 10 ⁻⁴
Chlorella ellipsoidea	43.72	10,026,400	4.4 x 10 ⁻⁶
Chlorella schroeteri	46.03	1,145,400	4.0 x 10 ⁻⁵
Eutreptiella gymnastica	224.23	75,400	3.0×10^{-3}
Isocrysis galbana	276.61	1,174,173	2.4 x 10 ⁻⁴
Coscinodiscus sp.	7.51	50	1.5×10^{-1}
Phaeodactyrum tricornutum	347.64	3,466,633	1.0×10^{-4}

Table 8. Estimated Chlorophyll-a quantities per unit cell for the 21 species

Species	Color	Size	Shape
Alexandrium catenella	Yellowish brown	21-48µm	sphere
Cochlodinium polykrikoides	Yellowish brown	30-40µm	ellipsoid
Gymnodinium catenatum	Yellowish brown	40-60µm	pentagon
Gymnodinium sanguineum	Yellowish brown	60 <i>µ1</i> m	pentagon
Gyrodinium sp.	Yellowish brown	6-8µm	ellipsoid
Gyrodinium aureolum	Yellowish green	25-35µm	sphere
Gyrodinium imputicum	Brown	20-30µm	sphere
Heterocapsa triquetra	Yellowish brown	20-30µm	sphere
Prorocentrum minimum	Yellowish brown	15-25µm	heart-shape
Prorocentrum micans	Brown	40-70µm	tear-shape
Prorocentrum dentatum	Yellowish brown	15-30µm	ellipsoid
Prorocentrum triestium	Yellowish brown	20-30µm	tear-shape
Scrippsiella trochoidea	Red	20-35 µm	sphere
Chattonella sp.	Golden brown	25-40µm	tear-shape
Chlamydomonas sp.	Green	5 <i>µ</i> m	sphere
Chlorella ellipsoidea	Green	5 <i>µ</i> m	sphere
Chlorella schroeteri	Green	5 <i>µ</i> m	sphere
Eutreptiella gymnastica	Green	20-40µm	rod
Isocrysis galbana	Brown	5 µm	sphere
Coscinodiscus sp.	Yellowish brown	100-200µm	circle
Phaeodactyrum tricornutum	Yellowish brown	5-10µm	needle

Table 9. Algae appearance and cell size for the 21 species

Fig. 7은 와편모조류(Diophyceae)에 속하는 식물플랑크톤의 비 흡광계수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 가로축은 파장대를 표시하며, 가시광 영역인 400 nm에서 700 nm까지이다. 세로축은 파장대에 따른 비 흡광계수이며, 단위는 m²/mg이다. Alexandrium catenella는 세포 크기가 21~48 um이며, 외형은 황갈 색을 띠는 구형이다. 스펙트럼에 나타난 흡광대는 630 nm와 680 nm이었으며, 400 nm 이하 파장대에서 계속 증가하는 추세를 보였다 (Fig. 7a). Cochlodinium polykrikoides의 형태적 특징은 세포는 대체로 8~16개체의 연쇄상 군체를 형성 하며 크기는 길이가 30~40 μm이다. 그리고 폭이 20~30 μm 정도이며 횡구는 잘 발달되어 있으나 종구는 폭이 매우 좁고 얕다. 이 종은 90년대 이후부터 한국 연해에서 가장 빈번히 적조를 일으키는 종으로 자체 독성은 없으나 점액 물질 분비로 어류의 아가미에 붙어 어류 폐사를 초래하는 유해적조 종이다. 광측정 결과 680 nm 이외에 다른 파장대에서 흡광대가 나타나지 않았으며, 400 nm 이하의 단파장대에서 계속 증가하는 추세를 나타냈다 (Fig. 7b). Gymnodinium catenatum은 세포의 크기가 46~60 µm이며, 외형은 황갈색을 띠 는 오각형이다. 680 nm에서 극값을 보이며 400 nm 이하의 단파장 대에서 계 속 증가하는 추세를 나타냈다 (Fig. 7c). Gymnodinium sanguineum은 세포의 길 이는 55~60 µm이고 폭은 35~58 µm로서 편모조류 중에서는 비교적 큰 편이 다. 횡구는 세포의 거의 중앙에 있으며 폭은 비교적 좁다. 색은 황갈색이며, 형태는 오각형이다. 비 흡광 스펙트럼 특징으로 630 nm에서 약한 흡광을 보였 으며, 680 nm에서 극값을 나타냈다. 그리고 400 nm 이하에서 증가하는 추세를 보였다 (Fig. 7d). Gyrodinium sp.는 cell의 크기가 6~8 µm이며, 외형은 황갈색을 띠는 타원형이다. 640 nm와 680 nm에서 흡광대를 나타냈으며 400 nm 이하 단파장 대에서 흡광이 계속 증가하는 추세를 나타냈다 (Fig. 7e). Gymnodinium aureolum은 세포 크기가 25~35 μm며, 외형은 황록색을 띠는 구형이다. 스펙트 럼에서 모두 4군데의 흡광대가 나타났다. 420 nm와 680 nm에서 주 흡광대가 나타났고, 580 nm와 635 nm에서 보조 흡광대가 나타났다 (Fig. 7f). Gymnodinium imputicum은 cell의 크기가 20 ~ 30 μm로 외형은 갈색을 띠는 구 형이다. 특징적으로 나타나는 흡광대는 680 nm이고 590 nm와 630 nm에서 아 주 약한 신호를 나타냈다. 그리고 400 nm 이하의 단파장 대에서 값이 계속 증 가하는 추세를 나타냈다 (Fig. 7g). Heterocapsa triquetra는 세포의 길이는 21~32 um, 폭은 19~24 um인데 세포의 외형은 방추형으로써 정단은 약간 편평 하고, 하각의 후단은 뾰족하다. 흡광 스펙트럼에서 약하게 굴곡들이 많이 나 타났으며 430 nm와 680 nm에서 주 흡광대를 보였다. 680 nm의 흡광대의 값 이 다른 와편모조류에 비해 크게 나타났으며 극값이 뾰족하고 두드러지게 나 타났다. 그 외에도 파장대 460 nm, 590 nm, 630 nm에서 약한 흡광대가 나타 났다 (Fig. 7h). Prorocentrum minimum은 세포의 크기가 15~25 µm이고, 외형이 황갈색을 띠며 둥근 형태를 나타내었다. 스펙트럼 모양은 작은 굴곡이 많은 형태인데 430 nm와 680 nm에서 주 흡광대와 460 nm, 490 nm, 580 nm, 630 nm에서 보조 흡광대가 나타났다 (Fig. 7i). Prorocentrum micans는 갈색을 띠고, 세포는 2개의 각판으로 되어 있다. 앞쪽에 2개의 편모가 있고, 세포의 길이는 35~70 um, 폭은 20~50 um이다. 세포의 앞쪽에는 짧은 정극이 있고 각판의 표 면에는 요철이 있어 구멍이 많은 것처럼 보인다. 비 흡광 스펙트럼은 430 nm 와 680 nm에서 주 흡광대가 나타나는데 흡광대가 다른 종에 비해 뾰족하게 나타났다. 그리고 590 nm와 630 nm에서 보조 흡광대를 보이며 전체적으로 굴 곡이 없이 매끈한 모양을 보였다 (Fig. 7j). Prorocentrum dentatum의 세포 크기 는 15~30 μm이며, 외형은 황갈색을 띠는 타원형이다. 400~450 nm에 걸친 폭 이 넓은 흡광대와 680 nm에서 주 흡광대를 나타내며 뚜렷이 나타나는 보조 홉광대는 없이 약간의 굴곡만 나타내었다 (Fig. 7k). Prorocentrum triestium은 430 nm와 680 nm에서 선명한 주 흡광대를 가지는데 680 nm 파장대에서 흡광 스펙트럼 모양은 좁고 뾰족하게 나타났다. 그리고 465 nm, 490 nm, 590 nm, 620 nm에서 보조 흡광대를 나타내며 스펙트럼 전체적으로 굴곡이 많이 보였 다 (Fig. 71). Scrippsiella trochoidea는 세포의 크기가 20~35 µm이며, 외형은 적

색을 띠는 구형이다. 비 흡광 스펙트럼은 전체적으로 굴곡이 없이 매끈한 형 태이며, 400~440 nm에서 넓게 흡광대가 나타나며, 680 nm에서 좁게 극값이 나타났다. 그 외 보조 흡광대는 630 nm에서 보였다 (Fig. 7m).



(A)Alexandrium catenella, (B)Cochlodinium polykrikoides, (C)Gymnodinium catenatum,
(D)Gymnodinium sanguineum, (E)Gyrodinium sp., (F)Gyrodinium aureolum, (G)Gyrodinium impudicum, (H)Heterocapsa triqutra, (I)Prorocentrum minimum, (J)Prorocentrum micans,
(K)Prorocentrum dentatum, (L)Prorocentrum triestium, (M)Scrippsiella trochoidea.

Fig. 7. Spectral values of the specific absorption coefficients(a^{*}) measured on Diophyceae.



Fig. 7. Continued.



Fig. 7. Continued.



Fig. 7. Continued.



Fig. 7. Continued.



Fig. 7. Continued.



Fig. 7. Continued.

Fig. 8은 침편모조류(Raphidopeaceae)에 속하는 *Chattonella* sp.의 비 흡광계 수 스펙트럼이다. 세포의 크기는 25~40 μm이고, 외형은 진한 황색을 띠는 물 방울 형태이다. 스펙트럼 형태는 전체적으로 작은 굴곡 없이 매끈한 형태이며, 430 nm와 680 nm에서 주 흡광대가 나타났고 630 nm에서 보조 흡광대가 보였 다.



Fig. 8. Spectral values of the specific absorption coefficients(a^{*}) measured on *Chattonella* sp. belong to the Raphidopeaceae.

Fig. 9은 녹조류(Chlorophyceae)의 비 흡광계수 스펙트럼을 보여준다. *Chlamydomonas* sp.는 세포의 크기는 5 μm로 미세플랑크톤(microplankton)에 속 한다. 외형은 녹색을 띠는 구형이다. 430 nm와 680 nm에서 주 흡광대가 나타 났으며 480 nm, 600 nm, 650 nm에서 보조 흡광대가 나타났다 (Fig. 9a). *Chlorella ellipsoidea*는 세포 크기가 5 μm이며, 외형은 녹색을 띠는 구형이다. 스펙트럼에서는 흡광대가 뚜렷하게 4 군데에서 나타났다. 430 nm와 680 nm에 서 주 흡광대가 나타났으며 480 nm, 630 nm에서 보조 흡광대가 나타났다. 그 외 다른 굴곡 없이 매끈한 형태이다 (Fig. 9b). *Chlorella schroeteri*는 세포 크기 가 5 μm이며, 외형은 녹색을 띠는 구형이다. 흡광대는 430 nm와 680 nm에서 주 흡광대가 나타났고 630 nm에서 작은 보조 흡광대를 보였으며, 490 nm와 650 nm에서 굴곡이 나타났다 (Fig. 9c).



(A)Chlamydomonas sp., (B)Chlorella ellipsoidea, (C)Chlorella schroeteri.

Fig. 9. Spectral values of the Specific absorption coefficients(a^{*}) measured on Chlorophyceae.



Fig. 9. Continued.

Fig. 10는 유글레나류(Euglenophyceae)에 속하는 *Eutriptiella gymnastica*의 비 흡광 스펙트럼을 보여준다. *Eutriptiella gymnastica*는 세포의의 크기가 20-40 μm이며, 외형은 녹색을 띠는 장대 형태이다. 430 nm와 680 nm에서 주 흡광대 를 보이며 475 nm와 650 nm에서 약한 굴곡을 나타내는 것 이외에 특징적인 홉광대가 나타나지 않았다.

Fig. 11은 착편모조류(Haptophyceae)에 속하는 *Isocrysis galbana*의 비 흡광 스펙트럼을 보여준다. *Isocrysis galbanad* 세포의 크기는 5 μm이며, 외형은 갈 색을 띠는 구형이다. 주 흡광대는 430~470 nm, 680 nm에서 나타났으며 630 nm에서 보조 흡광대가 보였다. 그리고 490 nm에서 굴곡이 약간 나타났으나 전체적으로 굴곡이 없는 매끈한 형태의 스펙트럼을 보였다.



Fig. 10. Spectral values of the specific absorption coefficients(a^{*}) measured on *Eutriptiella gymnastica* belong to the Euglophyceae.



Fig. 11. Spectral values of the specific absorption coefficients(a^{*}) measured on *Isocrysis galbana* belong to the Haptophyceae.

Fig. 12는 규조류(Bacillariophyceae)에 속하는 *Coscinodiscuc* sp.와 *Phaeodacturim tricrnutum*의 비 흡광계수 스펙트럼을 보여준다. *Coscinodiscuc* sp.는 세포의 크기가 100~200 μm 이고, 외형은 황갈색을 띠는 원형이다. 비 흡 광 스펙트럼의 형태는 400 nm 이하의 단파장 대에서 계속 증가하는 추세를 나타냈으며, 530 nm에서 약간의 굴곡이 있었고 680 nm에서 극값을 보였다 (Fig. 12a). *Phaeodacturim tricrnutum*는 세포의 크기가 5~10 μm이고, 외형은 황 갈색을 띠는 바늘모양이다. 스펙트럼의 형태가 전체적으로 굴곡이 많은 형태 고 홉광대가 뾰족한 극값을 나타내었다. 주 홉광대는 430 nm와 680 nm에서 끝이 뾰족한 모양으로 나타났으며, 보조 홉광대도 490 nm, 580 nm, 630 nm에 서 신호는 작지만 뚜렷하게 나타났다 (Fig. 12b).





Fig. 12. Spectral values of the specific absorption coefficients(a^{*}) measured on Bacillariophyceae.

3.3 식물플랑크톤의 파장에 따른 비 역산란계수 (b,*) 특성

Fig. 13은 본 연구에서 사용된 21종의 적조 생물 중에서 와편모조류 (Diophyceae)에 속하는 식물플랑크톤의 비 역산란 스펙트럼이다. 비 흡광계수 스펙트럼과 마찬가지로 가로축은 400~700 nm로 가시광 영역의 파장대이고, 세로축은 비 역산란계수로 단위는 m²/mg이다.



(A)Alexandrium catenella, (B)Cochlodinium polykrikoides, (C)Gymnodinium catenatum,
(D)Gymnodinium sanguineum, (E)Gyrodinium sp., (F)Gyrodinium aureolum, (G)Gyrodinium impudicum, (H)Heterocapsa triqutra, (I)Prorocentrum minimum, (J)Prorocentrum micans,
(K)Prorocentrum dentatum, (L)Prorocentrum triestium, (M)Scrippsiella trochoidea.

Fig. 13. Spectral values of the specific backscattering $coefficients(b_b^*)$ measured on Diophyceae.



Fig. 13. Continued



Fig. 13. Continued



Fig. 13. Continued



Fig. 13. Continued



Fig. 13. Continued



Fig. 13. Continued

Alexandrium catenella의 비역산란 스펙트럼은 전체적으로 장파장으로 갈 수록 값이 감소하는 추세를 보였으며, 480 nm와 670 nm에서 아래쪽으로 굴 곡을 보였다 (Fig. 13a). Cochlodinium polykrikoides는 비 역산란계수 값이 400~530 nm 까지 서서히 증가하는 추세를 보이다가 530~700 nm 까지 급격히 감소하였다. 그리고 480 nm와 680 nm에서 아래방향으로 아주 약하 굴곡이 나타났다 (Fig. 13b). Gymnodinium catenatum는 스펙트럼 전체에 거칠고 작은 굴곡이 많고 장파장으로 갈수록 값이 감소하는 추세를 나타냈다. 특징 파장 대는 430~460nm와 590 nm에서아래쪽으로 굴곡을 나타냈다 (Fig. 13c). Gymnodinium sanguineum의 스펙트럼은 부드러운 모양의 굴곡들이 있으며, 전 체적으로 장파장 쪽으로 갈수록 감소하는 형태를 보였다. 아래쪽, 위쪽 모두 두드러지는 극값은 없었으나 550 m 와 690 nm에서 위쪽으로 굴곡이 약간 보 였다 (Fig. 13d). Gvrodinium sp.는 400~750 nm까지 장파장으로 갈수록 비 역산 란계수가 감소하는 형태를 보이며 두드러지는 파장 특성은 없었으나 470 nm 에서 위쪽으로 약한 굴곡과 670 nm에서 아래쪽으로 굴곡이 나타났다 (Fig. 13e). Gymnodinium aureolum은 스펙트럼 모양이 약간 거칠게 작은 굴곡들이 있으며 전체적으로 장파장으로 갈수록 값이 감소하는 경향을 보였다. 3번의 굴곡이 크게 나타나는데 460 nm, 580 nm, 720 nm에서 아래쪽으로 극값이 나 타났다 (Fig. 13f). Gymnodinium imputicum은 스펙트럼의 형태가 장파장으로 갈 수록 감소하는 추세이며, 460 nm에서 아래쪽으로 극값을 보이는 것 외에 파 장 특성이 나타나지 않았다 (Fig. 13g). Heterocapsa triquetra는 400~700 nm 까 지 570 nm를 중심으로 좌우가 대칭되는 스펙트럼 형태를 나타냈다. 그리고 450 nm와 660 nm에서 아래방향으로 극값이 잘 나타났다 (Fig. 12h). Prorocentrum minimum은 450 nm와 670 nm에서 아래 방향의 극값을 나타냈으 며, 570 nm와 710 nm에서 위쪽으로 극값을 나타냈다. 400~710 nm까지 670 nm를 중심으로 좌우가 대칭구조를 보였다 (Fig. 13i). Prorocentrum micans는 스 펙트럼의 전체적인 형태가 부드럽고 둥글게 굴곡을 나타냈으며, 400~570 nm까

지 완만한 U자 형태를 보이고 680 nm에서 아래방향으로 극값을 나타내었다 (Fig. 13j). *Prorocentrum dentatum*은 스펙트럼 전체가 장파장으로 갈수록 값이 감소하는 추세를 보이며 가파른 굴곡이 많은 형태를 보였다. 440 nm, 550 nm, 650 nm에서 아래 방향의 극값을 나타냈고, 470 nm, 570 nm, 680 nm에서 윗방 향의 극값을 나타냈다 (Fig. 13k). *Prorocentrum triestium*은 450~680 nm에서 550 nm을 중심으로 완만한 굴곡을 나타내고 460 nm와 680 nm에서 아래방향 극값 을 보였다 (Fig. 13l). *Scrippsiella trochoidea*는 스펙트럼이 전체적으로 감소추세 를 보이며, 470 nm와 670 nm에서 아래방향, 680 nm에서 윗방향 극값을 나타 내었다 (Fig. 13m).

Fig. 14은 침편모조류(Raphidopeaceae)에 속하는 *Chattonella* sp.의 비 역산란 스펙트럼을 보여준다. *Chattonella* sp.는 400~600 nm까지 2번의 굴곡이 있으며 600~700 nm까지 굴곡 없이 약간 거친 형태의 스펙트럼을 나타냈다. 전체적으 로 장파장으로 갈수록 비 역산란계수가 감소하는 추세이며, 아래쪽으로 430 nm와 500 nm에서 극값이 있고, 위쪽으로 470 nm과 550 nm에서 극값이 나타 났다.

Fig. 15는 녹조류(Chlorophyceae)의 비 역산란 스펙트럼이다. *Chlamydomonas* sp.는 530 nm 이하에서 W자 형태의 굴곡이 있고, 550 nm 이후 장파장 쪽으로 감소하다가 680 nm에서 두드러지게 아래방향 극값을 타나냈다 (Fig. 15a). *Chlorella ellipsoidea*는 400~700 nm 까지 550 nm를 중심으로 좌우 대칭 형태를 보였다. 430 nm와 490 nm 그리고 680 nm에서 두드러지게 아래방향으로 극값 을 나타내었다 (Fig. 15b). *Chlorella schroeteri*의 스펙트럼은 400~680 nm까지 530 nm를 중심으로 좌우 대칭 형태를 나타냈다. 430 nm와 660 nm에서 아래 방향으로 극값을 나타냈으며, 530 nm와 680 nm에서 위쪽으로 극값을 보였다. 그리고 470 nm와 630 nm에서도 약하게 굴곡을 나타내었다 (Fig. 15c).



Fig. 15. Spectral values of the specific backscattering coefficients(b_b*) measured on Chlorophyceae. (A)Chlamydomonas sp., (B)Chlorella ellipsoidea, (C)Chlorella schroeteri.



Fig. 15. Continued

Fig. 16은 유글레나 (Euglophyceae)에 속하는 *Eutreptiella gymnastica*의 비역 산란 스펙트럼이다. *Eutreptiella gymnastica*는 비 역산란계수 값이 400-610 nm 까지 서서히 감소 추세를 보였으며 400-650 nm까지 스펙트럼 모양이 거칠었 다. 또한 680 nm에서 아래쪽으로 뚜렷한 극값을 나타냈으며 470 nm와 530 nm에서 아래방향으로 작은 굴곡을 보였다.



Fig. 16. Spectral values of the specific backscattering coefficients(b_b^*) measured on *Eutriptiella gymnastica* belong to the Euglophyceae.

Fig. 17은 착편모조류(Haptophyceae)인 *Isocrysis galbana*의 비 역산란 스펙 트럼을 보여준다. 전체적으로 굴곡의 경사가 급하고, 400-680 nm까지 570 nm 를 중심으로 좌우 대칭이며 W자 형태를 나타내었다. 아래방향 극값은 430 nm 와 660 nm 윗방향 극값은 570 nm와 680 nm으로 나타났다.



Fig. 17. Spectral values of the specific backscattering coefficients(b_b^*) measured on *Isocrysis galbana* belong to the Haptophyceae.

 Fig. 18은 규조류(Bacillariophyceae)의 비 역산란 스펙트럼을 보여준다.

 Coscinodiscuc sp.는 장파장으로 갈수록 감소하는 추세를 보이며 480 nm와 600

 nm에서 완만한 굴곡이 나타났다 (Fig. 18a). Phaeodacturim tricrnutum는 400-700

 nm까지 550 nm를 중심으로 좌우 대칭 형태를 나타냈으며, 430 nm와 680 nm

 에서 아래방향으로 극값이 나타났다 (Fig. 18b).



Fig. 18. Spectral values of the specific backscattering coefficients(b_b*) measured on Bacillariophyceae. (A)Coscinodiscuc sp., (B)Phaeodacturim tricrnutum.

	Optical Properties					
Species	Absorption spectrum properties	Backscattering spectrum properties				
	Diophyceae					
Alexandrium catenella	cell is damaged at below 400 nm in absorption spectrum					
Cochlodinium polykrikoides	"					
Gymnodinium catenatum	NATIONAL					
Gymnodinium sanguineum	2	- NIL				
Gyrodinium sp.		ER				
Gyrodinium aureolum	420 nm, 575 nm, 635 nm, 680 nm	two towering hump, rough line, decrease forward to long wavelength				
Gyrodinium impudicum	cell is damaged at below 4	00 nm in absorption spectrum				
Heterocapsa triqutra	435 nm, 460 nm, 490 nm, 590 nm, 630 nm, 675 nm	wide hump at 520 nm				
Prorocentrum minimum	435 nm, 460-470 nm, 490 nm, 590 nm, 620 nm, 680 nm	hump at 570 nm, 710 nm, very weak hump at 520 nm				
Prorocentrum micans	590 nm, 630 nm, 680 nm	downward hump at 680 nm, Amplitude is low and flat				
Prorocentrum dentatum	520-530 nm, 680 nm	decrease forward to long wavelength, hump at 465 nm, 570 nm, 680 nm				
Prorocentrum triestium	440 nm, 460 nm, 490 nm, 530 nm, 590 nm, 625 nm, 680 nm	downward hump at 460 nm, 680 nm, symmetric with respect to the 550 nm				

Table 10. Spectral characteristics of absorption and backscattering of the 21 species

Table 10. Continued.

	Optical Properties				
Species	Absorption spectrum properties	Backscattering spectrum properties			
Serippsiella trochoidea	430 nm, 470 nm, 540 nm, 630 nm, 675 nm	decrease forward to long wavelength, flat hump at 560 nm, 700 nm			
Raphidopeaceae					
Chattonella sp.	420-440 nm, 490 nm, 630 nm, 675 nm	hump at 400-570 nm , decrease forward to long wavelength			
	Chlorophyceae	1.			
Chlamydomonas sp.	440 nm, 480 nm, 590 nm, 650 nm, 680 nm	hump at 460 nm, 520 nm, 700 nm, very weak hump at 660 nm			
Chlorella ellipsoidea	440 nm, 485 nm, 630 nm, 680 nm	symmetric with respect to the 550nm in 400-700 nm			
Chlorella schroeteri	435 nm, 480-490 nm, 620 nm, 655 nm, 670 nm	symmetric with respect to the 530nm in 400-680 nm			
Ta	Euglenophyceae				
Eutriptiella gymnastica	430 nm, 480 nm, 650 nm, 680 nm	decrease forward to long wavelength			
	Haptophyceae	N/			
Isocrysis galbana	430-470 nm, 490 nm, 635 nm, 680 nm	symmetric with respect to the 460 nm, weak hump at 480 nm			
Bacillariophyceae					
Coscinodiscus sp.	cell is damaged at below 400) nm in absorption spectrum			
Phaeodactyrum tricornutum	440 nm, 460 nm, 490 nm, 585 nm 630 nm, 675 nm	flat shape all over, weak and flat hump at 550 nm, weak hump at 670 nm, 690 nm			

3.4. 식물플랑크톤의 분류군에 따른 파장대별 광특성 비교

Table 11는 식물플랑크톤의 비 흡광 스펙트럼과 비역산란 스펙트럼의 파 장에 따른 스펙트럼 형태와 값의 특성을 정리한 것이다. 400 nm 이하는 비흡 광(non-absorption)대 임에도 불구하고 비 흡광계수 스펙트럼에서 400 nm이하의 단파장에서 비 흡광계수가 증가 추세를 보이는 것은 배양 또는 실험과정에서 셀이 파괴되었거나 세포 생장 말기 상태로서 신뢰할 수 없는 결과를 보이는 것으로 판단된다.

주 흡광대는 모든 종에서 공통적으로 파장대 430~440 nm, 670~680 nm에 서 나타났으며, 종에 따라 490 nm, 560 nm, 630 nm 등에서 크고 작은 흡광대 가 나타났다. 비역산란 스펙트럼에서는 스펙트럼의 형태가 장파장 쪽으로 감 소 추세를 보이는 종과 550~570 nm 부근을 중심으로 단파장 쪽과 장파장 쪽 이 대칭 형태를 나타내는 종 등 종에 따라 서로 다른 형태를 나타냈으며 굴곡 크기의 변화가 적고 작은 등 값에서도 종에 따른 차이를 나타냈다.

LPCM 분석에 따르면 밝혀진 광합성색소 물질은 50여 가지 종류가 있으며 (Fig. 19) (H. Claustre et al., 1989), 규명되지 않은 물질까지 고려하면 그 수는 100여 종류가 넘는다. 본 연구에서는 적조 생물에서 밝혀진 흡광대와 관련된 광합성물질을 E. Rabinowitch.(1969) 및 Morel et al. (1993)의 연구결과를 기준 으로 정리하였다(Table 11).

Fig. 19는 와편모조류에 속하는 Gyrodinium aureolum, Heterocapsa triquetra,Prorocentrum minimum, Prorocentrum dentatum, Prorocentrum micans,Prorocentrum triestium, Scrippsiella trochoidea (a)와 녹조에 속하는 Chlorellaellipsoidea, Chlamydomonas sp., Chlorella schroeteri (b)를 파장 550 nm에서nomalization 하여 비교한 비 흡광 스펙트럼이다. 와편모조류에 속하는 대부분의 종들은 Gyrodinium aureolum 만을 제외하고 모두 400~450 nm에서 완만한형태의 흡수대, 600 nm 부근에서 가장 낮은 흡광을 나냈으며 590 nm에서

약한 보조 흡광대를 나타냈다. 반면 녹조류는 430 nm 부근에서 극값, 550 nm 에서 최저 흡광대를 나타냈으며, 460 nm, 640 nm에서 흡광이 급격히 감소하는 형태를 나타냈다.

Fig. 21은 와편모조류(a)와 녹조류(b)를 파장 550 nm에서 normalization 하 여 비교한 비 역산란 스펙트럼이다. 와편모조류에 속하는 식물플랑크톤들은 종마다 차이는 있으나 460 nm, 580 nm, 720 nm에서 아래 방향으로 극값이 있는 *Gyrodinium aureolum*를 제외하고는 450 nm와 670 nm 부근에서 아래방향 으로 극값을 나타내고, 대체로 W 형태로 두 번의 굴곡이 있으며 400~700 nm 범위에서 570 nm 부근을 중심으로 대칭의 형태를 나타냈다. 또한 녹조류에 속하는 종들은 440 nm, 490 nm, 680 nm에서 아래 방향의 극값과 460~470 nm, 540 nm, 700 nm 부근에서 윗방향의 극값을 나타냈다. 녹조류는 대체로 비 역산란 스펙트럼의 형태가 비 홉광 스펙트럼을 엎어 놓은 것과 유사한 형 태를 보였다.

No.	in-vivo absorption band (nm)	Pigments
1	410-412	chlorophyll-a
2	438-440	chlorophyll-a like
3	442-445	chlorophyll-a
4	468-472	Carotenoids
5	492	phycoerythrins
6	548-550	phycoerythrins
7	585	-
8	625-630	phycoerythrins
9	650-655	chlorophyll-b
10	675-680	chlorophyll-a

Table 11. Light absorption bands and related photosynthetic pigments of phytoplankton



Fig. 19. Light absorption bands in the some phytoplankton (redtide algae in the South Sea and some cultured species at LPCM in France).

Fig. 22는 400 nm 이하의 파장대에서 비 흡광계수 스펙트럼이 증가하는 추세를 보인 종을 제외한 실험에 사용된 모든 종들의 비 흡광 스펙트럼과 비 역산란 스펙트럼을 나타낸 것이다. 종에 따라 차이는 있으나 와편모조류, 침 편모조류, 녹조류, 유글레나류, 착편모조류, 규조류와 같은 분류군에 따라 유 사한 그래프의 형태와 계수 값을 나타내는 것을 볼 수 있었다.

대체적으로 비 역산란 스펙트럼은 비 흡광 스펙트럼과는 반대방향으로 극값을 보여 비 흡광 스펙트럼을 뒤집어 놓은 것과 유사한 형태를 나타냈으 며, 비 역산란계수는 비 흡광계수보다 10⁻² 정도로 아주 낮은 값을 가졌다. 비 역산란 스펙트럼에서 값의 범위는 10⁻² ~ 10⁻⁴ mg/m²의 범위로 종에 따라 약 100배의 차이를 보였다.


Fig. 20. Spectral values of the specific absorption coefficients(a^{*}) measured on Diophyceae(a) and Chlorophycea(b).



Fig. 21. Spectral values of the specific backscattering $coefficients(b_b^*)$ measured on Diophyceae(a) and Chlorophycea(b).



Fig. 22. Spectral values of the specific absorption $coefficients(a^*)$ (a) and backscattering $coefficients(b_b^*)$ (b) on measured all species.

제 4 장 결 론

우리나라에서 출현하는 식물플랑크톤 중에서 적조를 일으키는 생물은 약 40여 종으로 알려져 있다. 저온 고염인 겨울철에는 주로 규조류에 의한 적조 현상이 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 때 는 Choclodinium polykrikoides 종이, 같은 수온분포에서 염분이 낮은 수역에서 는 Heterosigma akashiwo, 수온이 높은 수역에서는 Prorocentrum micans와 같은 종이 적조 우점종으로 출현한다.

본 연구에서는 적조 모니터링에 원격탐사 기술을 활용하는데 있어 기초자 료를 제공하고자 한국 연안에서 빈번히 적조를 발생시키는 주된 식물플랑크톤 을 중심으로 광학적 특성을 연구하였다.

우리나라에서 적조를 발생시키는 21종의 식물플랑크톤을 실험실에서 순수 배양 하고 dual beam spectrophotometer를 이용해 흡광계수(absorption coefficient, a), 감쇠계수(attenuation coefficient, c)를 측정하였다. 측정된 a와 c의 차를 이용 해 b를 계산하고 엽록소 농도와 Volume scatterign function (β(θ))를 이용하여 a^{*}, b_b^{*}를 계산하였다. 21종 중 Gymnodinium catenatum, Gymnodinium imputicum, Gyrodinium sp., Gymnodinium sanguineum, Cochlodinium polykrikoides, Coscinodiscus sp., Alexandrium catenella는 비 흡광대인 400 nm 이하의 파장대 에서 흡광이 계속 증가하는 추세를 보였는데 이는 배양 또는 실험과정에서 세포가 손상되었거나 성장말기를 지나 그 특성을 잃은 세포로 사료된다.

적조 생물은 파장 440 nm와 680 nm 부근에서 공통적으로 주 흡광대가 나 타났으며, 종들에 따라 460 nm, 530 nm, 590 nm 등 각각 조금씩 다른 보조 흡광대가 나타났다. 이는 식물플랑크톤이라 할지라도 각각이 가지는 색소의 종류가 다르기 때문이며, 이러한 보조 흡광대의 차이는 식물플랑크톤의 종의 식별을 가능하게 한다. a의 신호에 비해 b_b의 신호는 10⁻² 정도로 매우 작은 값 을 나타냈으나 이는 종마다 스펙트럼 모양과 값의 변화 폭이 달라 종을 구분 할 수 있는 중요한 특성이라고 할 수 있다.

분류군에 따라서 식별 가능한 파장 특성이 있는 비 흡광 및 비 역산란 스 펙트럼을 나타냈다. 와편모조류의 경우 비 흡광 및 비 역산란계수 값이 다른 분류군 보다 낮게 나타났으며 굴곡의 형태도 완만하고 극값도 낮게 나타났다. 녹조류의 경우는 높고 뾰족한 극값을 보이며 비 역산란계수에서는 570 nm를 중심으로 400-700 nm 범위에서 대칭되는 형태의 스펙트럼을 나타냈다.

녹조류인 Chlamydomonas sp., Chlorella ellipsoidea, Chlorella schroeteri는 내 부 엽록소 농도가 가장 낮고, 생체크기도 가장 작은 것으로 나타났다. 그러나 이들의 비 흅광계수는 다른 종들보다 현저히 크게 나타났다. 반면, 규조류에 속하는 Coscinodiscus sp.는 내부 엽록소 농도가 가장 높고, 생체크기도 가장 컸으나 비 홉광계수는 가장 낮게 나타났다. 따라서 비 홉광과 비 역산란계수 의 차이는 세포의 내부 엽록소 농도와 세포 크기에 의해 결정된다고 볼 수 있 다. 홉광계수는 내부 엽록소 농도와 세포 크기와 반비례하며, 이러한 현상은 package effect에 의한 영향으로 알려졌다 (Kirk, 1975 and 1976).

본 연구에서는 한국 주변 해역에서 빈번히 적조를 발생시키는 식물플랑크 톤에 관한 광특성을 분석적 측면에서 연구하였으며, 이들 결과는 해색 모델 개발에 있어 한국 주변 해역의 적조 해색 모델의 입력 변수로 활용될 수 있을 것이다. 또한 Hyper-spectral 위성의 개발 및 활용이 활성화 되어 감에 따라 적 조 원격탐사 수행 시 한국 주변 해역에 활용 가능한 IOP 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

제5장 참고문헌

국립수산과학원, 2000, 적조 (III), 243-319.

국립수산과학원, 2003, National Report on HABs in Korea, pp. 56.

한국해양연구원, 1998, 해양원격탐사기술 개발을 위한 해색 분석모델의 개발, pp. 63. 한국해양연구원, 1999, 위성에 의한 적조 및 해수 탁도 원격탐사 기술개발, pp. 287. 윤홍주, 남광우, 조한근, 변혜경, 2004. 원격탐사를 이용한 한국 남해 중부 해 역에서의 적조 예찰 연구, 한국해양정보통신학회, 8(4), 938-945.

- Ahn, Y. H., Shanmugam, P., J. H. Ryu and J. C. Jeong, 2006. Satellite detection of harmful algal bloom occurrences in Korean waters. *Harmful Algae*, 5, 213-231.
- Ahn, Y. H., A. Bricaud and A. Morel, 1992. Light backscattering efficiency and related properties of some phytoplankters. *Deep-Sea Research*, 39(11), 1835-1855.
- Bidigare, R. R., Ondrusek, M. E., Morrow, J. H., & Kiefer, D. A., 1990. In vivo absorption properties of algal pigments. *Ocean Optics X, Proc. SPIE*, 209-302.
- Carder, K. L., and Steward, R. G., 1985. A remote-sensing reflectance model of a red tide dinoflagellate off West Florida. *Limnol. Oceanogr.*, 30, 286-298.
- 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. *Limnol. Oceanogr.*, 47, 404-417.
- Claustre, H., Marty, J.-C., Mantoura. R. F. C. and Llewellyn, C., 1989. Banque de connees de carotenoides et de chlorophylles au sein de 40 especes de

phytoplankton. Report final No.890501, LPCM in University of Paris VI, France.

- Dale A. Kiefer and Janice Beeler SooHoo, 1982. Spectral absorption by marine particles of coastal waters of Baja California. *Limnol. Oceanogr.*, 27(3), 492-499.
- Gordon, H.R., and A. Morel, 1983. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery. A review, Springer-Verlag, New York (USA).
- Guillard, R. R. L., and J. H. Ryther, 1962. Studies of marine planktonic diatoms.
 1, Cyclotella nana Hustedt and Detonulla conferbacea (Cleve) Gran. Can. J. Microbiol. 8, 229-239.
- Hallegraeff, G. M., D. M. Anderson and A. D. Cembella, 1995. Manual on harmful marine microalgae. UNESCO, pp.551.
- Hoepffner, N., and Sathyendranath, S., 1991. Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton. *Marine Ecology. Progress Series*, 73, 11-23.
- Jeffrey, S. W. and G. F. Humphrey, 1975. New spectrophotometeric equations for determining chlorophylls a, b, c and c in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochemie Physiologie Pflanzen, 167, 374-384.
- Kirk, J. T. O., 1975. A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters. 1. General treatement of suspension of living cell. New Phytol., 75, 11-20.
- Kirk, J. T. O., 1976. Yellow substance (Gelbstoff) and its contribution to the attenuation of photosynthetically active radiation in some inland and coastal south-eastern Australian waters. Aust. J. Mar. *Freshwater Res.*, 27, 61-71.

Kirk, J. T. O., 1986. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge:

Cambridge Univ. Press.

- L. McLeroy-Etheridge and C. S. Roesler. Are the inherent optical properties of phytoplankton responsible for the distinct ocean colors observed during harmful algal blooms. *Ocean Optics, Proc. SPIE*.
- Lee, C. K., H. C. Kim, S. G. Lee, C. S. Jung, H. G. Kim and W. A. Lim. 2001. Abundance of Harmful Algae, Cochlodinium polykrikoides, Gyrodinium inoudicum and Gymnodinium catenatum in the Coastal Area of South Sea of Korea and Their Effects of Temperature, Salinity, Irradiance and Nutrient on the Growth in Culture. J. Kor. Fish. Soc. 34(5), 536-544.
- Maffione, R. A. and D. R. Dona, 1997. Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters. Applied Optics, 36(24), 6057-6067.
- Morel A., Y. H. Ahn, F. Partensky, D. Voulot and H. Claustre, 1993. Prochlorococcus and Synechococcus : a comparative study at their optical properties in relation to their size and pigmentation. J. Mar. Res., (51), 617-649.
- Morel, A. and A. Bricaud, 1981. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Res.*, 28, 1375-1393.
- Morel, A. and L. Prieur, 1977. Analysis of variations in ocean color, *Limnol. Oceanogr.*, 22, 709-722.
- Oh, S. J., H. Y. Yang, D. I. Kim, Shimasaki, Y., Oshima, Y. and Honjo, T. Effects of Light Quantity and Quality on the Growth of the Harmful Dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* Margalef(Dinophyceae). Algae, 21(3), 311-316.
- Prieur, L. and S. Sathyendranath, 1981. An optical classification of coastal and

oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnol. Oceanogr.*, 26(4), 671-689.

Rabinowitch, E. and Govindjee, 1969. Photosynthesis. John Wiley & Soins, Inc.

- 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*, 26(2), 191–212.
- Roesler, C. S. and M. J. Perry, K. L. Carder, 1989. Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnol. Oceanogr.*, 34(8), 15 10-1 523.
- Roesler, C. S. and McLeroy-Etheridge. S. L., 1998. Remote Detection of harmful algal blooms. *Ocean Optics*, K'ailua-Kona Hawaii USA, November 10-13, 1988.
- Sathyendranath, S., L. Lazzara and L. Prieur, 1987. Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 32, 403-415.
- Suh, Y. S., J. H. Kim and H.G. Kim. 2000. Relationship between sea surface temperature derived from NOAA satellites and *Cochlodinium polykrikoides* red tide occurrence in Korean coastal waters. J. Kor. Environ. Sci. Soc., 9(3), 215-221.
- Suh, Y. S., L. H. Jang and H. G. Kim. 2003. Relationships between Spatio-Temporal Distribution of Cochlodinium polykrikoides Red Tide and Meso-scale Variation of Oceanographic Environment around the Korea Waters. J. Kor. Associ. Geographic Information. Stud., 6(3), 139-150.

Suh, Y. S., L. H. Jang, N. K. Lee and J. Ishizaka, 2004. Feasibility of Red Tide

Detection Around Korean Waters Using Satellite Remote Sensing. J. Fish. Sci. Tech., 7(3), 148-162.

Van der Piepen, V., R., Doerffer, 1991. Remote Sensing of Substances in Water. Geojournal, 24(1), 27-48.



감사의 글

벌써 2년이란 시간이 흘러 그동안의 결실을 내어놓게 되었습니다. 좀 더 열심히 하지 못한것에 대한 아쉬움이 있지만 부족하게나마 이루어낸 논문에 도움을 주신 모든 분들께 감사드립니다.

대학 2학년 때부터 오늘 날까지 부족한 제자를 이끌어주신 윤홍주 지도교 수님 감사드립니다. 실수도 많이 하고 실망도 시켜드렸지만 항상 바로잡아주 시고 일어설 수 있도록 지도해주심에 깊은 감사를 드립니다. 학부 때부터 대 학원을 거쳐 많은 시간을 함께 하시며 많은 학문적 가르침과 인생의 조언을 아끼지 않으셨던 김영섭 교수님, 배상훈 교수님 그리고 최철웅 교수님 감사드 립니다. 그리고 부족한 학생이지만 지켜봐주시고 날카로운 조언과 따뜻한 격 려로 가르침을 주신 한경수 교수님 그리고 서용철 교수님 감사드립니다.

연구실에서 동고동락하며 많은 정보를 주고 부족한 것을 가르쳐준 한근 선배와 혜경 언니에게도 고마움을 전합니다.

해양연구원에서 새로운 많은 것들을 경험하고 배울 수 있게 허락해주시고 모르는 것을 가지고 갈 때마다 바쁘신 중에도 따뜻하게 답해주신 안유환 단장 님 감사드립니다. 학생들이 진취적이고 좀더 넓게 생각할 수있도록 이끌어주 시고 격려해주신 유흥룡 박사님께 감사드립니다. 제가 게을러 질 때마다 일깨 워주시고 많은 지원과 격려를 아끼지 않으셨던 양찬수 박사님, 날카로운 충고 와 격려로 든든한 힘이 되어주시고 여러 상황들 속에서 올바른 길의 선택에 도움을 주신 유주형 박사님께도 감사드립니다. 연구실 생활하는 동안 논문뿐 만 아니라 실험과 모든 부분에서 도움과 가르침 주시고, 새벽까지 실험에 도 움주신 문정언 선배님 깊은 감사드립니다. 그리고 힘들 때나 어려울 때 선배 로서, 언니로서 상담해주고 세세하게 챙겨주고 조언해준 지은언니 감사합니다. 많은 힘이 되고 가르침이 되었습니다. 그리고 항상 넉넉하고 고운 마음으로 함께해준 석이 언니, 지식검색 역할을 해주신 한태현 씨, 한희정 씨께도 감사 드립니다. 바쁘신 와중에도 생물배양에 무지한 저에게 많은 도움을 주신 노재 훈 박사님, 신희재 박사님께도 감사의 말씀 드립니다.

석사 시작부터 논문이 나오기 까지 많은 고민을 들어주시고 격려와 도움 을 아끼지 않으신 태순 선배께 깊은 감사드립니다. 그리고 항상 좋은 정보 제 공해주는 병석선배도 고마워요.

2년 동안 한 방에 살면서 까탈스러운 성격 다 받아주고 힘들 때 같이 나 눠준 규희 언니 고마워요. 대학시절 때부터 항상 함께하며 기쁨과 슬픔을 함 께했던 친구 정림이와 은희에게도 고마움을 전한다.

어머니, 아버지 저를 믿고 응원해 주시고 저의 든든한 버팀목이 되어주셔 서 감사드립니다. 존재만으로도 저에게 살아갈 힘을 주고 의지가 되는 분입니 다. 세상에서 가장 많이 사랑합니다. 그리고 누나의 빈자리를 잘 지켜가고 있 는 사랑하는 동생 요한아 고맙다.

마지막으로 제가 지칠 때는 쉴만한 물가로 인도하시고, 저의 필요를 누구 보다 잘 아시고 채워주시는 하나님께 감사와 찬양을 드립니다. 저는 약하고 부족하지만 저를 쓰시는 주님의 능력은 무한하시기에 그런 아버지께 의지하며 주님의 일꾼으로 다시 한걸음 나아갑니다. 어제도, 오늘도 그리고 내일도 항상 저와 동행하시는 하나님께 작은 저의 결실을 바칩니다.

> 2007년 8월 이누리 드림