

## SeaWiFS 밴드역에 의한 연안해역의 엽록소 밴드비율 알고리즘 검증

정종철 · 유신재\*

남서울대학교 지리정보공학과, 한국해양연구소\*

### The Validation of chlorophyll-a band ratio algorithm of coastal area using SeaWiFS wavelength

Jong-Chul Jeong and Sin-Jae Yoo\*

Dep. of Geoinformatic Engineering, NAMSEOUL University, Korea Ocean Research and Development Institute\*

**Abstract :** Since being launched for ocean observing in 1997, the SeaWiFS sensor has supplied data on ocean chlorophyll distribution and environmental conditions of the atmosphere. Until now, a lot of SeaWiFS data have been archived and utilized for ocean monitoring and land observation. The SeaWiFS sensor has 1km spatial resolution, therefore, it is difficult to obtain data at the coastal zone. Since atmospheric correction algorithms at the coastal area have not been confirmed for chlorophyll algorithm, the ocean color data analysis for coastal zone is not common. In particular, domestic coastal areas have high suspended sediments concentrations and higher absorption influence of colored dissolved organic matter (CDOM), released from in-land, than open-sea. Thus, a useful algorithm for analysis of chlorophyll distribution in domestic coastal areas has not been developed. In this study, empirical algorithms, using data from the ocean color sensor, were developed for monitoring of chlorophyll distribution of coastal areas. In the process of the development of the algorithms, we can find that the red band (665nm) should be used for analyzing of domestic coastal areas near the Yellow Sea.

**Key Words :** chlorophyll, band ratio algorithm, SeaWiFS, coastal area

**요 약 :** 해양관측위성으로 1997년에 발사된 SeaWiFS 센서는 해양의 엽록소 분포와 대기환경 등 다양한 지구관측 자료를 제공하고 있고, 현재까지 수신된 많은 자료는 해양뿐만 아니라 육상관측에도 이용되고 있다. 하지만, SeaWiFS 센서는 1 km의 공간해상력으로 인해 연안해역의 관측이 어렵고, 연안역에서의 대기보정 문제가 아직 정립되지 않아 연안해역의 관측에는 아직 활발히 적용되지 못하다. 특히, 서.남해 연안해역은 부유사 농도가 높고, 육상에서 비롯되는 용존유기물의 흡광으로 엽록소 분포를 분석하기에 적합한 알고리즘이 개발되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 해양의 엽록소 농도분포를 분석하는데 활용되어온 경험적인 알고리즘을 바탕으로 연안해역의 엽록소 분포를 분석하기에 적합한 경험식을 도출하였으며, 이러한 경험식을 도출하는 과정에서 연안해역의 엽록소 농도 관측을 위해서는 레드영역의 밴드 (665nm)가 활용되어야 한다는 결론을 얻었다.

## 1. 서론

위성영상을 이용한 표층의 엽록소 분포에 관한 연구는 CZCS와 OCTS에 의한 해상센서가 이용되었고, 높은 공간해상력을 가진 Landsat TM, MSS와 SPOT HRV에 의하여 광범위한 연안지역의 엽록소, 부유사 분포 등이 공간적으로 평가되어 왔다 (Reddy, 1993; Hamilton, 1993; Mulheam, 1995; Huh *et al.*, 1996).

위성자료에 의한 해양과 연안해역에서의 엽록소 분포는 위성자료를 해석할 수 있는 알고리즘이 요구되는데 위성센서가 지닌 분광 파장대역에 의한 경험적인 알고리즘이 널리 이용되었고, 영상신호와 실측치간의 다중회귀분석과 같은 통계적인 관계식에 의해 엽록소의 공간적인 분포를 파악하였다. 하지만, 이러한 연구는 수중의 엽록소와 다른 구성성분, 예를 들어 용존유기물, 부유사 등의 흡광과 산란 특성을 고려하지 못한 경험식의 단점을 지니고 있다. 그럼에도 불구하고 경험식을 이용한 방법, 특히 밴드비율에 의한 엽록소 추출 알고리즘은 대기의 오차요인을 감소시키고, 계산시간이 해석적인 방법에 비하여 적게 소요된다는 장점을 지니고 있어서 해양의 엽록소 분포를 해석하는데 널리 이용되고 있다.

본 연구에서는 수중 광학 측정기로부터 얻어진 SeaWiFS 밴드역의 밴드별 반사치를 구하고, 반사치의 밴드비율에 의한 통계적인 경험식을 구성하였다. 특히, 밴드비율 알고리즘에 적용 가능한 밴드역을 선정하고, 이를 비교하여 부유사 농도가 높은 국내 연안해역의 엽록소 알고리즘을 구성하는데 적합한 밴드구성을 찾는 데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 연구방법 및 범위

본 연구의 공간적인 범위는 조석의 영향으로 부유사 농도가 높은 경기만, 천수만, 진해만이고,

1997년 4월부터 1998년 4월까지 계절별로 조사하였다. 각 조사정점에서 수온, 수심, 염도 등을 현장 실측하고, 표층에서 채수한 시료를 분석하여 엽록소와 부유사를 정량적으로 평가하였다.

엽록소와 식물색소량 측정은 Balch (1996)의 방법을 응용하였다. 현장에서 채수한 시료를 47mm GF/F 여과지에 걸러낸 뒤 13ml의 90% 아세톤에 추출하였다. 추출한 시료는 syringe filter set를 이용하여 GF/C 여과지에 걸러 입자를 제거한 뒤 Turner fluorometer (Turner Designs model 10)로 산화법에 의해 분석하였다.

수중 광학측정을 위하여 SeaWiFS센서와 동일한 파장대역을 지닌 PRR-600 (Profiling Reflectance Radiometer; Biospherical Co.)에 의해 수중에 유입되는 광량 (downwelling irradiance:  $E_d$ )과 수체로부터 반사와 흡수가 이루어진 수면 위로 올라오는 광량 (upwelling radiance:  $L_u$ )을 측정하였다.

PRR-600은 여섯 개 채널 (412, 443, 490, 510, 555, 665nm)을 가지고 있으며, 각 채널은 10nm의 밴드 폭을 지닌다. PRR-600을 통해 얻은 광량 자료는 식 (1)에 의해 원격탐사 반사치 (remote sensing reflectance)를 구하였다. 이 방법은 수심에 따른 유입 광량과 수면으로 올라오는 광량을 수표면 바로 위에서 얻어지는 값으로 보정하여 반사치를 구하였다. 여기서, 빛이 수면을 통과할 때 나타나는 굴절율과 빛의 감쇄효과를 보정계수를 이용하여 보정한다. 본 연구에서는 Mitchell and Kahru (1997)의 식 (1)과 같이 0.54와 1.04의 값을 대기과 해수면에서의 보정계수로 적용하였다.

$$R_{rs}(\lambda, 0^+) = [0.54 * L_u(\lambda, 0^-)] / [1.04 * E_d(\lambda, 0^-)] \quad (1)$$

$R_{rs}(\lambda, 0^+)$  : remote sensing reflectance just above sea surface

$L_u(\lambda, 0^-)$  : upwelling radiance extrapolated to just below sea surface ( $\mu W cm^{-2} sr^{-1} nm^{-1}$ )

$E_d(\lambda, 0^-)$  : downwelling irradiance extrapolated to just below sea surface ( $\mu W cm^{-2} nm^{-1}$ )

0.54 and 1.04 : transfer coefficients of the air-sea interface

### 3. 밴드비율 알고리즘 도출

본 연구에서 얻고자하는 엽록소 알고리즘은 경험적인 방법에 의한 밴드비율 알고리즘이다. 이러한 밴드비율 알고리즘은 CZCS, OCTS, SeaWiFS 등의 해색 센서 알고리즘으로 이용되었고, TM, MSS, SPOT 등의 육상관측용 센서에서도 엽록소와 부유사를 정량적으로 해석하는데 이용되었다.

국내 연안해역은 O'Reilly *et al.*, (1998)에 의해 Table 1과 같이 제시된 알고리즘을 적용하여 엽록소를 정량적으로 해석하기 어렵다. 이는 높은 부유사 농도와 용존유기물 농도 때문에 엽록소의 흡

광과 반사 특성만을 고려한 경험적인 알고리즘은 국내 연안해역의 엽록소를 정량적으로 해석하는데 적합하지 않기 때문이다. 따라서, 수중 광학 측정에 의해 각 밴드의 반사치와 현장 실측치를 비교하여 부유사의 반사와 용존유기물의 흡광에 의한 영향을 반영할 수 있는 엽록소 알고리즘을 구성하였다. 먼저, 각 밴드영역의 반사치 (remote sensing reflectance)를 구하여 연안해역의 조사지역에서 나타나는 밴드별 반사치 경향을 해석하였다. 둘째, 알고리즘의 기본식에 적용할 밴드를 선정 후 현장실측치와 비교하여 지수함수식, 이차식과 삼차식을 적용하여 엽록소 알고리즘을 만들었다.

위성자료를 이용하여 엽록소를 정량적으로 해석하는 원리는 엽록소의 파장별 흡광 특성을 이용하는데, Sathyendranath (1994)는 엽록소의 흡광대역인 400-500nm와 엽록소 농도의 영향을 받지

Table 1. Empirical algorithms for chlorophyll-a (O'Reilly *et al.*, 1998)

Algorithm	Result Equation(s)	Band Ratio(R), Coefficients(a)
Global Processing	$C_{12}=10^{(a_0+a_1*R_1)}$ $C_{23}=10^{(a_2+a_3*R_2)}$ [C+P]=C <sub>13</sub> ; if C <sub>13</sub> and C <sub>23</sub> > 1.5 µg/l then [C+P]=C <sub>23</sub> a = {0.053, -1.705, 0.522, -2.440}	R1=log(Lwn443/Lwn550) R2=log(Lwn520/Lwn550)
Clark three-band	[C+P]=10 <sup>(a<sub>0</sub>+a<sub>1</sub>*R)</sup> a = {0.745, -2.252}	R=log((Lwn443+Lwn520)/Lwn550)
OCTS-C	C=10 <sup>(a<sub>0</sub>+a<sub>1</sub>*R)</sup> a = [-0.55006, 3.497]	R=log((Lwn520+Lwn565)/Lwn490)
OCTS-P	[C+P]=10 <sup>(a<sub>0</sub>+a<sub>1</sub>*R<sub>1</sub>+a<sub>2</sub>*R<sub>2</sub>)</sup> a = [0.19535, -2.079, -3.497]	R1=log(Lwn443+Lwn520) R2=log(Lwn490+Lwn520)
POLDER	C=10 <sup>(a<sub>0</sub>+a<sub>1</sub>*R+a<sub>2</sub>*R<sup>2</sup>+a<sub>3</sub>*R<sup>3</sup>)</sup> a = [0.438, -2.114, 0.916, -0.851]	R=log((Lwn443+Lwn520)/Lwn550)
Morel 1	C=10 <sup>(a<sub>0</sub>+a<sub>1</sub>*R)</sup> a = [0.444, -2.431]	R=log(Rrs490/Rrs555)
Morel 2	C=exp(a <sub>0</sub> +a <sub>1</sub> *R) a = [1.077835, -2.542605]	R=ln(Rrs490/Rrs555)
Morel 3	C=10 <sup>(a<sub>0</sub>+a<sub>1</sub>*R+a<sub>2</sub>*R<sup>2</sup>+a<sub>3</sub>*R<sup>3</sup>)</sup> a = [0.20766, -1.82878, 0.75885, -0.73979]	R=log(Rrs490/Rrs555)
Morel 4	C=10 <sup>(a<sub>0</sub>+a<sub>1</sub>*R+a<sub>2</sub>*R<sup>2</sup>+a<sub>3</sub>*R<sup>3</sup>)</sup> a = [1.03117, -2.40134, 0.3219897, -0.291066]	R=log(Rrs490/Rrs555)

\* C : chlorophyll-a, P : phaeo-pigment, [C+P] : pigment

않는 500-600nm 영역의 밴드에서 얻어진 수중 광학 측정 결과에 의해 이들 파장영역의 반사치를 구하여 수중 알고리즘을 구성함으로써 위성자료에 의한 엽록소의 정량적인 평가가 가능하다고 하였다. 따라서, 경기만, 천수만, 진해만의 전 조사지역에서 얻어진 수중 광학 측정치에 의한 반사치를 SeaWiFS와 동일한 6개 밴드별로 비교하고, 각 밴드의 반사치 비율에 의한 관계식을 구하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서 실측된 수중 광학 측정치를 Mitchell and Kahru (1997)의 관계식을 통해 계산한 밴드별 반사치의 상관분석 결과는 Table 2와 같다. CZCS와 OCTS는  $R_{rs}(443)$ 과  $R_{rs}(490)$ 의 반사치를 엽록소의 흡광에 의해 수중의 엽록소 농도를 정량적으로 해석하는데 이용하고 있다. 하지만, 조사지역에서 얻어진 반사치는 Table 2와 같이  $R_{rs}(443)$ 과  $R_{rs}(490)$ 이 높은 상관관계를 나타내고 있으며, 상관계수는 0.99을 나타내고 있다. 또한, 용존유기물과 엽록소에 의한 흡광의 영향을 관찰할 수 있는  $R_{rs}(412)$ 와  $R_{rs}(443)$ 은 0.98의 상관계수를 나타내고 있다.

$R_{rs}(510)$ 과  $R_{rs}(555)$ 는 부유물질의 영향에 의해 반사치의 변화가 민감하게 나타나는 밴드영역으로 상관계수는 0.9361의 결과를 나타내고 있다.  $R_{rs}(555)$ 는 국내 연안해역의 조사지점에서 반사치 최대값을 나타내는 밴드로서 부유사의 정량적인

변화에 대해 가장 반사치의 변화가 크게 나타나는 밴드이다.

이에 반해  $R_{rs}(443)$ 과  $R_{rs}(555)$ 는 부유사가 낮은 농도의 수역에서 엽록소를 정량적으로 해석하는 엽록소 알고리즘에 사용된 밴드로서 CZCS 엽록소 알고리즘에서 적용하고 있는 밴드이다. 특히,  $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 밴드는  $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$  밴드비율과 함께 California Cooperative Fisheries Investigations (CalCOFI) 연구의 엽록소 알고리즘을 적용하고 있는 밴드이다 (Mitchell and Kahru, 1997).

본 연구의 밴드별 반사치 비교에서는  $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$  밴드비율에 적용된 두 밴드의 상관계수가 0.8746을 나타내고 있고,  $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$  밴드비율에 적용된 밴드의 상관계수는 0.90101을 나타내고 있어서 두 밴드간의 높은 상관관계로 인해 엽록소를 정량적으로 해석하기에 부적합한 것으로 판단된다.

본 연구의 현장조사에 의해 실측된 이들 두 밴드의 반사치 분포를 Fig. 1에 제시하였다. Fig. 1a의  $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 의 밴드비율은 용존유기물의 영향이 적은 원양 (open sea)에서 엽록소를 정량적으로 해석하는데 적합하고, 엽록소 농도가  $1\mu\text{g L}^{-1}$ 이하의 낮은 농도 분포를 나타낼 경우 위성자료에 의한 분석치가 높은 정확도를 나타내는 밴드 비율이다.

반면에 엽록소 농도가 높고 용존유기물의 흡광에 의한 영향이 큰 연안해역에서는 Fig. 1b의  $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 의 밴드비율을 적용하는 것이 엽

Table 2. Correlation matrix of reflectance using PRR-600

	$R_{rs}412$	$R_{rs}443$	$R_{rs}490$	$R_{rs}510$	$R_{rs}555$	$R_{rs}665$
$R_{rs}412$	1					
$R_{rs}443$	0.98503	1				
$R_{rs}490$	0.96204	0.99068	1			
$R_{rs}510$	0.95545	0.97992	0.99471	1		
$R_{rs}555$	0.88016	0.87460	0.90101	0.93610	1	
$R_{rs}665$	0.72352	0.66609	0.66489	0.71087	0.86527	1

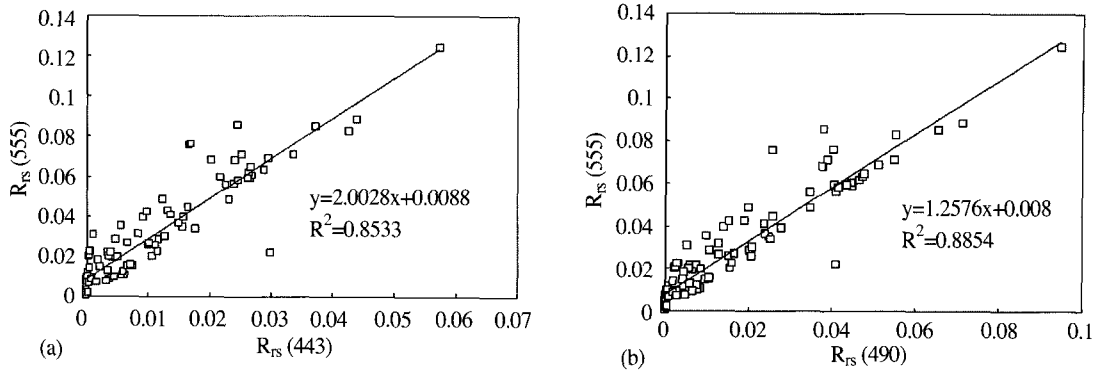


Fig. 1. Relationship between (a)  $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$  and (b)  $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ , respectively.

록소를 정량적으로 해석하는데 있어서 더 정확한 값을 얻을 수 있다. 이는 용존유기물의 영향이 큰 해역의 경우 용존유기물의 흡광에 의한 영향을  $R_{rs}(443)$  보다 적게 받는  $R_{rs}(490)$ 을 이용하는 것이 타당하기 때문이다.

국내 연안해역은 부유사 농도가 높아서 부유사에 의한 산란의 영향이 밴드별 반사치에 크게 반영되어 Fig. 1b 에 제시한 결과와 같이  $R_{rs}(490)$ 과  $R_{rs}(555)$ 는 결정계수가 0.8854의 높은 상관관계를 나타내고 있다. 결국, CalCOFI 연구와 O'Reilly *et al.* (1998)의 경험적 알고리즘에서 제시한  $R_{rs}(555)$ 를 이용한 엽록소의 정량적인 해석이 본 연구의 조사지역인 연안해역과 시화호에서는 부적합하다는 결과를 얻었다.

Fig. 2a 는 Fig. 1a에서 제시한 밴드별 반사치의

관계를  $R_{rs}(665)$  밴드에 의해 비교한 것이다. Fig. 2에서  $R_{rs}(490)$ 은  $R_{rs}(443)$ 에 비해  $R_{rs}(665)$  밴드와 낮은 상관관계를 나타냈다.

수중에 존재하는 엽록소와 부유사의 흡광과 산란 특성은 각 밴드의 밴드 별 반사치 경향에 반영되어 나타나는데,  $R_{rs}(443)$ 과  $R_{rs}(665)$ 는 0.6559의 결정계수를 나타냈고,  $R_{rs}(490)$ 과  $R_{rs}(665)$ 는 결정계수가 0.6165를 나타내어 밴드의 상관관계가 낮고, 각 조사지역별 반사치 경향에서 볼 수 있는 부유물질의 반사 특성을 최소화할 수 있다. 따라서,  $R_{rs}(443)/R_{rs}(665)$ 의 밴드비율과  $R_{rs}(490)/R_{rs}(665)$ 의 밴드비율 관계식이 엽록소 농도를 정량적으로 해석하는데 적합한 밴드로 판단된다.

밴드비율 관계식은  $R_{rs}(443)$ ,  $R_{rs}(490)$ ,  $R_{rs}(555)$ ,  $R_{rs}(665)$  밴드에 의한 밴드비율을 반사치의 상관

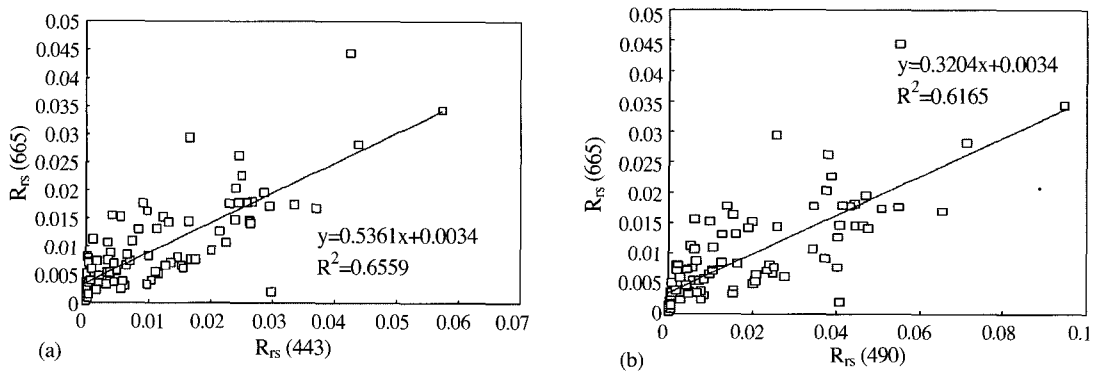


Fig. 2. Relationship between (a)  $R_{rs}(443)/R_{rs}(665)$  and (b)  $R_{rs}(490)/R_{rs}(665)$ , respectively.

관계 분석에 의해 얻어진 밴드비율의 조합에 의해 구성되었다. Table 3은 본 연구에서 적용된 밴드 비율의 조합과 적용관계식에 의해 JC1부터 JC8까지 알고리즘의 이름을 부여하고, 각각의 알고리즘에서 얻어진 결과를 제시한 것이다.

현장 조사된 실측 엽록소 농도와 각각의 알고리즘을 통해 얻어진 결정계수 ( $r^2$ )는 알고리즘 JC7과 JC8 즉,  $R_{rs}(490)/R_{rs}(665)$ 에서 0.8 이상의 값을 나타냈다. 이는 밴드별 반사치의 상관분석과 공분산 결과에서 얻어진  $R_{rs}(490)/R_{rs}(665)$  밴드비율이 엽록소 알고리즘에 가장 적합하다는 결과와도 일치하는 것이다.

본 연구에서  $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$  밴드비율과 현장에서 실측된 엽록소의 관계는 CalCOFI 연구에서 제시한  $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$  밴드비율 결과에 비해 낮은 결정계수를 나타내고 있다. 이는 경기만, 천수만, 진해만의 높은 부유사 농도가  $R_{rs}(555)$ 의 변이에 영향을 미치기 때문이다. 또한,  $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 와 엽록소 농도의 관계에서  $R_{rs}(490)$ 은  $R_{rs}(443)$ 에 비해 용존유기물에 의한 흡광의 영향

이 적은 밴드로서 연안해역과 시화호는 육상에서 유입되는 용존유기물의 농도가 높아 Table 3의 JC1과 JC2 알고리즘보다 JC3과 JC4 알고리즘이 엽록소를 예측하는데 보다 나은 결과를 나타냈다.

$R_{rs}(443)/R_{rs}(665)$ 와  $R_{rs}(490)/R_{rs}(665)$ 의 밴드비율과 엽록소 농도를 비교한 결과는 Table 2에서 밴드 반사치 간의 상관관계를 비교하여 얻은 결과와 같이  $R_{rs}(443)/R_{rs}(665)$ 보다는  $R_{rs}(490)/R_{rs}(665)$ 의 밴드비율에 의한 관계식이 높은 결정계수 값을 나타냈다. 결국, 본 연구에서 JC7과 JC8 엽록소 알고리즘이 국내 연안해역과 시화호의 엽록소를 정량적으로 해석하는데 적합한 방법이라는 결론을 얻었다.

본 연구에서 도출된 밴드비율에 의한 엽록소 알고리즘은 다음의 같이 검증되었다. JC7과 JC8 알고리즘의 관계식에 본 연구의 전 조사지역에서 실측된 반사치 ( $R_{rs}$ )를 적용하여 계산된 엽록소 농도와 동일지점의 현장에서 실측된 엽록소 농도를 Fig. 3에 제시하였다.

Fig. 3a 는  $R_{rs}(490)/R_{rs}(665)$  밴드비율의 결과를

Table 3. Band ratio algorithms in coastal areas and Lake Sihwa of this study

Algorithm	Result Equation(s), Band Ratio(R), Coefficients(a), $r^2$
JC1	$C=10^{(a_0+a_1 \cdot R+a_2 \cdot R^2+a_3 \cdot R^3)}$ a = [18.676, -40.666, 29.131, -6.5304] R=log(Rrs443/Rrs555) $r^2 = 0.6202$
JC2	$C=10^{(a_0+a_1 \cdot R+a_2 \cdot R^2)}$ a = [-5.549, 7.1711, -1.7824] R=log(Rrs443/Rrs555) $r^2 = 0.5828$
JC3	$C=10^{(a_0+a_1 \cdot R+a_2 \cdot R^2+a_3 \cdot R^3)}$ a = [42.788, -104.35, 83.727, -21.615] R=log(Rrs490/Rrs555) $r^2 = 0.7202$
JC4	$C=10^{(a_0+a_1 \cdot R+a_2 \cdot R^2)}$ a = [-6.7906, 9.568, -2.6491] R=log(Rrs490/Rrs555) $r^2 = 0.6999$
JC5	$C=10^{(a_0+a_1 \cdot R+a_2 \cdot R^2+a_3 \cdot R^3)}$ a = [-3.4507, 5.6275, -1.0841, -0.2697] R=log(Rrs443/Rrs665) $r^2 = 0.7741$
JC6	$C=10^{(a_0+a_1 \cdot R+a_2 \cdot R^2)}$ a = [-3.9633, 6.9109, -2.1193] R=log(Rrs443/Rrs665) $r^2 = 0.774$
JC7	$C=10^{(a_0+a_1 \cdot R+a_2 \cdot R^2+a_3 \cdot R^3)}$ a = [0.9843, -6.5093, 10.579, -3.9731] R=log(Rrs490/Rrs665) $r^2 = 0.8054$
JC8	$C=10^{(a_0+a_1 \cdot R+a_2 \cdot R^2)}$ a = [-2.8734, 5.5443, -1.5836] R=log(Rrs490/Rrs665) $r^2 = 0.8022$

\* C : chlorophyll-a concentration, Rrs : Remote Sensing Reflectance

삼차식의 관계식을 통해 실측치와 계산치를 비교한 것이고, Fig. 3b는 이차식의 관계식을 통해 실측치와 계산치를 비교한 것이다. 실측치와 계산치의 엽록소 농도는 JC7 알고리즘의 삼차식인 경우 0.674의 결정계수 ( $r^2$ )를 나타냈고, RMSE (Root Mean Square Error)는  $13.027\mu\text{g L}^{-1}$ 를 나타냈다. 또한, JC8 알고리즘의 이차식인 경우 0.6831의 결정계수를 나타냈으며, RMSE는  $12.859\mu\text{g L}^{-1}$ 를 나타냈다. 두 관계식에 의한 결과는 모두  $90\mu\text{g L}^{-1}$  이상의 엽록소 농도를 나타낸 두 개의 정점에서 오차가 크게 나타났다. Fig. 3에서 현장조사된 엽록소 농도는  $0-110\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도 분포를 나타내고 있고,  $60\mu\text{g L}^{-1}$  이상의 엽록소 농도를 정량적으로 해석하는데는 본 연구에서 도출한 JC7과 JC8 알고리즘에서 사용하고 있는 밴드비율의 적용이 부적합하다. 이는 엽록소 농도가 증가할수록 반사치 밴드역이 490nm에서 510nm 또는 555nm로 이동하여  $60\mu\text{g L}^{-1}$  이상의 엽록소 농도를 정량적으로 해석하는데는  $R_{rs}(510)/R_{rs}(665)$  밴드비율이 적용될 수 있기 때문이다.

Dekker (1993)는 엽록소 농도가 높은 육상의 호수에서 TM 밴드의 1번 밴드부터 4번 밴드의 DN (Digital Number)를 식물색소량, 부유물질 농도와 비교하여 일차회귀식을 구성하였다. 엽록소를 정량적으로 해석하는 관계식의 구성에서 Dekker *et al.* (1993)는 현장 실측치와 TM 자료만을 비교하고 있다.

또한, 그는  $0-20\mu\text{g L}^{-1}$ 의 엽록소 농도 범위에서는 TM에 의한 엽록소 추정치가 낮은 정확도를 나타내며,  $200\mu\text{g L}^{-1}$ 농도까지 정량적으로 해석할 수 있다고 하였다. 하지만, 본 연구에서는 수중 광학 측정에 의한 밴드별 반사치와 현장 실측치를 비교하여 알고리즘을 구성하였고, 알고리즘을 구성한 엽록소의 농도범위가  $0-60\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에 분포하여 Fig. 3과 같이  $60\mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 농도범위에서 계산치 오차가 크게 나타나고 있다.

이러한 결과는 경험적인 밴드비율 관계식이 가지는 한계점이다. 연안해역과 같은  $0-20\mu\text{g L}^{-1}$  엽록소 농도를 가지는 조사지역에서 구성된 경험적인 밴드비율 알고리즘과  $60\mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 엽록소 농도에서 구성된 알고리즘의 적용은 엽록소 흡광대역의 변화로 알고리즘을 구성하는 밴드가 달라진다. Gordon *et al.* (1988)에서 제시한 NASA 표준의 CZCS 알고리즘은 해양의 엽록소를 정량적으로 해석하면서  $1.5\mu\text{g L}^{-1}$ 를 기준으로  $L_w(443/550)$  밴드비율과  $L_w(520/550)$  밴드비율을 사용하고 있다. 즉,  $1.5\mu\text{g L}^{-1}$  이상의 엽록소 농도를 정량적으로 해석하는데는  $L_w(520/550)$  밴드비율을 사용하고 있다.

수중 광학 측정을 통해 구성된 엽록소 밴드비율 알고리즘은 Table 3에서 제시한 바와 같이 JC7과 JC8 알고리즘이 본 연구의 조사지역에 가장 적합하다. JC7과 JC8 알고리즘은  $R_{rs}(490)$ 과  $R_{rs}(665)$ 의 밴드비율에 의해 구성된 관계식으로 본 연구의

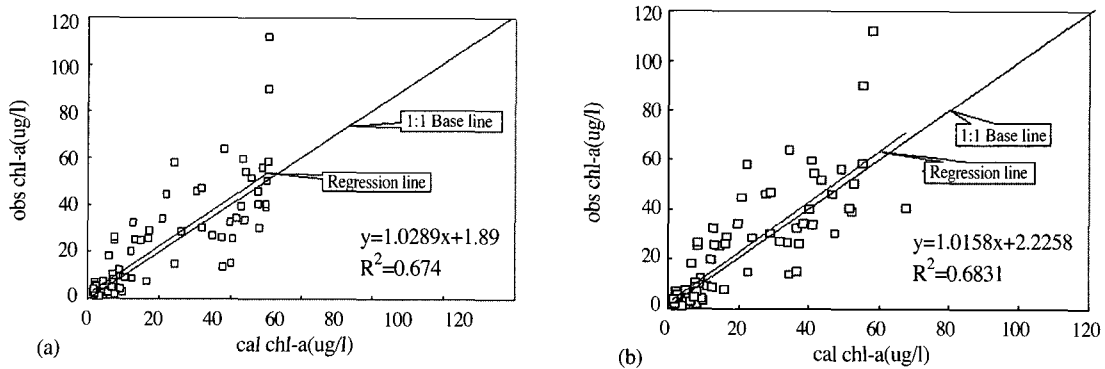


Fig. 3. Relationship between calculated chlorophyll-a and observed chlorophyll-a (a) the third order equation, and (b) the second order equation, respectively.

공간적 범위에 적용 가능한 TM의 1번 밴드 (485nm)와 3번 밴드 (660nm)의 중심파장과도 같은 위치의 밴드 영역으로 구성되어 있다.

현장 실측치에 의한 JC7과 JC8 알고리즘의 검증에서 JC8 알고리즘이 JC7보다 낮은  $12.859\mu\text{g L}^{-1}$ 의 RMSE를 나타내었고, Fig. 3과 같이 결정계수도 0.6831로 JC8 알고리즘이 엽록소를 해석하는데 더 적합한 것으로 나타났다. 따라서, TM 반사치를 JC8 알고리즘에 적용하여 TM 자료에 의해 엽록소 농도를 계산할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구는 해색센서인 SeaWiFS 밴드대역의 수중 광학 측정기를 이용하여 국내 연안해역에서 밴드별 반사치를 구하고, 이들 반사치에 의한 통계적인 밴드비율 알고리즘을 구성하였다. 국내 연안해역은 부유사와 용존유기물의 농도가 높고 이들 물질에 의한 흡광과 산란의 영향으로 해색센서에서 엽록소를 정량적으로 계산해 내는 밴드비율 알고리즘을 사용하는 것은 많은 오차를 나타낸다. 따라서, 연안해역의 엽록소 분포를 정량적으로 해석해내기 위한 밴드역으로  $R_{rs}(490)$ 과  $R_{rs}(665)$ 의 밴드비율에 의해 구성된 관계식이 용존유기물과 부유사의 산란과 흡광의 영향을 최소화할 수 있는 밴드비율 알고리즘으로 제시되었다. 이러한 밴드대역은 현재 SeaWiFS 엽록소 알고리즘에서 사용하고 있는 밴드역과는 다른  $R_{rs}(665)$ 의 밴드역이 연안역 관측에 적합하다는 결과를 나타내었다. 또한, 665nm 대역은 SeaWiFS 밴드에서 아직 엽록소 알고리즘을 구성하는데 사용하고 있지 않은 밴드역으로 국내 연안역과 같이 용존유기물과 부유사의 농도가 높은 지역의 엽록소 분포 관측을 위한 밴드역으로 제안할 수 있다.

이러한 연구결과에도 불구하고 밴드비율에 의한 경험식은 엽록소의 농도 범위에 따른 오차가 발생하고 경험식이 지니는 단점을 지니고 있어서 수중 구성성분의 흡광과 산란 특성에 의한 해석

적인 방법에 의한 엽록소 알고리즘의 구성이 요구된다.

### 참고문헌

Balch, W. M., K. A. Kilpatrick, and C. C. Trees, 1996, The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic 1. Optical properties and factors affecting their distribution, *Limnol. Oceanogr.*, 41(8):1669-1683.

Dekker, A. G., and S. W. M. Peters, 1993, The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes : a case study in the Netherlands, *Int. J. Remote Sens.*, 14(5):799-821.

Hamilton, M. K., C. O. Davis, W. J. Rhea, and S. H. Pilorz, 1993, Estimating chlorophyll content and bathymetry of lake Tahoe using AVIRIS data, *Remote Sens. Environ.*, 44:217-230.

Huh, O. K., C. C. Moeller, W. P. Menzel, L. J. Rouse, and H. H. Roberts, 1996, Remote sensing of turbid coastal and estuarine waters: A method of multispectral water-type analysis, *J. Coastal Res.*, 12(4):984-995.

Mitchell, B. G., and M. Kahru, 1997, Algorithms for Sea-WiFS standard products developed with the CalCOFI bio-optical data set, *SEABAM report*.

Mulhearn, P. J., 1995, Landsat reflectivities versus Secchi disc depths, *Int. J. Remote Sens.*, 16(2):257-268.

Reddy, N. A., 1993, Remote sensing mapping of suspended sediments in Krishna Bay Estuary, Andhra, India. *Int. J. Remote Sens.*, 14(11):2215-2221.

O'Reilly, J. E., S. Maritorena, B. G. Mitchell, D. A. Siegel, K. L. Carder, 1998, Ocean color



- chlorophyll algorithms for SeaWiFS, *J. Geoph. Res.*, 103(C11):24937-24953.
- Sathyendranath, S., F. E. Hoge, T. Platt, R. N. Swift, 1994, Detection of phytoplankton pigments from Ocean Color - Improved Algorithms, *Applied Optics.*, 33(6):1081-1089.
- Jeong, J. C., 1999, *Water Quality Evaluation for Coastal Waters and Lake Sihwa Using Remote Sensing Techniques*, Seoul National University, Ph. D. thesis, pp.2-12.