

# 경험적인 방법에 의한 한반도 주변 해역에서 성분별 흡광계수 산출 알고리즘 개발에 관한 연구

문정언<sup>1,2</sup>, 안유환<sup>1</sup>, 유주형<sup>1</sup>, 최중기<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 해양위성센터

경기도 안산시 상록구 사2동 1270번지, E-mail: jemoon@kordi.re.kr

<sup>2</sup>인하대학교 해양학과

## Development of Absorption Coefficients Estimation Algorithms for the Water Components by Empirical Method around Korean Waters

Jeong-Eon Moon, Yu-Hwan Ahn, Joo-Hyung Ryu, Joong-Ki Choi

### 요약

1998년 8월부터 2005년 6월까지 한반도 주변 해역에서 현장관측한 해수의 고유 광특성 (IOPs)과 외형적 광특성(AOPs) 자료들을 이용하여 원격반사도( $R_{rs}(\lambda)$ )와 성분별 흡광계수의 총합 ( $a(\lambda)=a_w(\lambda)+a_{ph}(\lambda)+a_{ss}(\lambda)+a_{dom}(\lambda)$ )의 상관관계를 분석하고,  $R_{rs}(\lambda)$  밴드비를 이용하여 흡광계수 산출 알고리즘을 개발하였다. 파장에 따른  $R_{rs}(\lambda)$ 와 총합  $a(\lambda)$ 의 상관관계는 반비례적인 관계를 보였고, 파장 443 nm일 때 상관도( $R^2$ )는 0.717이다.  $a_{ph}(\lambda)$  산출 알고리즘은 엽록소의 흡광과 관련된 파장 490 nm와 부유물의 산란과 관련된 파장 555 nm의  $R_{rs}(\lambda)$  밴드비의 함수 형태로 구성하였고, 파장 443 nm일 때 RMS 값은 0.223이다.  $a_{ss}(\lambda)$ 과  $a_{dom}(\lambda)$  산출 알고리즘은 용존유기물의 흡광과 관련된 파장 412 nm와 부유물의 산란과 관련된 파장 555 nm의  $R_{rs}(\lambda)$  밴드비의 함수 형태로 구성하였고, 파장 412 nm일 때 RMS 값은 각각 0.324와 0.230이다.  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_{ss}(\lambda)$ ,  $a_{dom}(\lambda)$  산출 알고리즘들은 대체적으로 현장값보다 높게 추정하였고 스펙트럼들은 잘 재현해냈다. 추후 이에 대한 개선과 알고리즘의 검보정이 요구된다.

### 1. 서론

해양의 광학적인 특성에는 해수 고유의 광 특성 (Inherent Optical Properties, IOPs)과 해수 외형적인 광 특성 (Apparent Optical Properties, AOPs)로

구분된다. IOPs는 외형적인 영향에 상관 없이 해수가 가지고 있는 고유의 광학적인 특성으로 감쇠계수 (attenuation coefficient,  $c$ ), 흡광계수 (absorption coefficient,  $a$ ), 산란계수 (scattering

coefficient,  $b$ )가 있다.

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (1)$$

식(1)에서와 같이 감쇠계수는 흡광계수와 산란계수의 합이고, 흡광계수와 산란계수는 해수에 함유된 각 성분별 합으로 표현된다.

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_{ss}(\lambda) + a_{dom}(\lambda) \quad (2)$$

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_{ph}(\lambda) + b_{ss}(\lambda) \quad (3)$$

$$b(\lambda) = b_f(\lambda) + b_b(\lambda) \quad (4)$$

여기서,  $a_w(\lambda)$ 와  $b_w(\lambda)$ 는 각각 순수한 물 입자의 흡광과 산란계수이고,  $a_{ph}(\lambda)$ 와  $b_{ph}(\lambda)$ 는 각각 식물플랑크톤의 흡광과 산란계수이고,  $a_{ss}(\lambda)$ 와  $b_{ss}(\lambda)$ 는 각각 부유물 입자의 흡광과 산란계수이고,  $a_{dom}(\lambda)$ 는 용존유기물의 흡광계수이다. 산란계수는 각 성분별 전방산란계수 (forward scattering coefficient,  $b_f$ )와 역산란계수 (backscattering coefficient,  $b_b$ )의 합으로 표현된다.

AOPs는 외형적인 영향에 따라 변화하는 해수의 광학적인 특성으로 총하향광량 (downwelling irradiance,  $E_d$ ), 총상향광량 (upwelling irradiance,  $E_u$ ), 수출광량 (water leaving radiance,  $L_w$ ), 반사도 (reflectance,  $R$ ), 원격반사도 (remote sensing reflectance,  $R_{rs}$ ) 등이 있다.

$$R(\lambda) = \frac{E_u(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (5)$$

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (6)$$

반사도와 원격반사도는 각각 식(5)와 식(6)과 같이 표현되고, 반사도와 IOPs와의 관계식은 다음과 같다(Gordon *et al.*, 1975; Morel and Prieur, 1977; Gordon and Morel, 1983; Gordon *et al.*, 1988).

$$R(\lambda) = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (7)$$

$$Q(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{R_{rs}(\lambda)} \quad (8)$$

위 식에서  $Q$  값은 해수와 대기광 상태에 따라 정해지는 해수 신호의 방향성을 나타내는 인자이다. 식(7)과 식(8)에 의해 원격반사도와 IOPs와의 관계식은 다음과 같다.

$$R_{rs}(\lambda) = \left( \frac{f}{Q(\lambda)} \right) \times \left( \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \right) \quad (9)$$

해색원격탐사에서 식(9)를 기반으로 경험적인 방법, 반분석적인 방법, 분석적인 방법, 인공신경망을 이용한 방법 등 다양한 기법들을 활용하여 위성자료로부터 IOPs를 추정하는 알고리즘들이 개발되었다. 특히  $a_{ph}(\lambda)$ 는 IOPs에서 가장 중요한 변수들 중 하나이다. 경험적인 방법에서, 위성자료로부터  $a_{ph}(\lambda)$ 를 산출하는 주된 방법으로는 (1) 위성자료로부터 엽록소 농도를 산출하고 (2) 이미 알려진 식물플랑크톤의 비흡광계수 (specific absorption coefficient of phytoplankton,  $a_{ph}^*$ )와 산출된 엽록소 농도 값을 이용하여  $a_{ph}(\lambda)$ 를 추정하는 것이다. 그러나 이러한 방법은 엽록소 산출 알고리즘의 정확도와  $a_{ph}^*(\lambda)$ 의 대표 스펙트럼 설정 등에서 많은 에러를 유발할 것이다. 또한  $a_{ss}(\lambda)$  산출은 위와 동일한 방법으로 가능하지만,  $a_{dom}(\lambda)$ 은 불가능하다.

본 연구에서는 한반도 주변 해역에서 원격반사도와 성분별 흡광계수의 총합  $a(\lambda)$ 의 상관관계를 분석하고자 한다. 또한  $R_{rs}(\lambda)$  밴드비와  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_{ss}(\lambda)$ ,  $a_{dom}(\lambda)$  각각의 상관관계를 분석하여 경험적인 흡광계수 산출 알고리즘을 개발하고 제안하고자 한다.

## 2. 자료 및 방법

1998년 8월부터 2005년 6월까지 한반

도 주변 해역에서 IOPs와 AOPs 등을 현장관측하였다(그림1). 관측정점수는 총 251개이다.

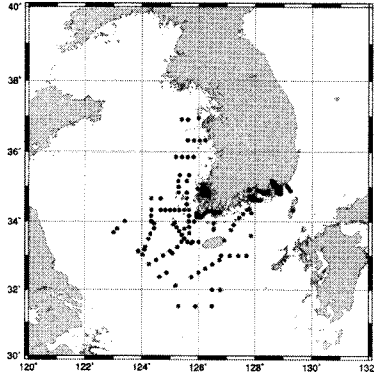


그림1. 한반도 주변 해역에서 해양 광특성 현장관측정점도(1998년 8월 - 2005년 6월)

### 2.1. $a_{ph}(\lambda)$ , $a_{ss}(\lambda)$ , $a_{dom}(\lambda)$ 측정

$a_{ph}(\lambda)$ 과  $a_{ss}(\lambda)$ 을 측정하기 위하여 25 mm GF/F와 여과시스템을 이용하여 채수한 표층 해수를 각 관측정점별로 평균 500 ml를 여과하였다. spectrophotometer를 이용하여 식물플랑크톤과 부유물질에 대한 Optical Density (O.D)를 파장 400 - 750 nm까지 스캐닝하였다.  $a_{ph}(\lambda)$ 과  $a_{ss}(\lambda)$ 은 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$a_{ph}(\lambda) = \frac{O.D_{ph}(\lambda) \times 2.3025}{\left(\frac{V}{S}\right) \times \beta} \times 100 \quad (10)$$

$$a_{ss}(\lambda) = \frac{O.D_{ss}(\lambda) \times 2.3025}{\left(\frac{V}{S}\right) \times \beta} \times 100 \quad (11)$$

여기서, " $\frac{V}{S}$ "는 여과한 해수의 양( $V$  ml)을 여과할 때 입자에 의하여 필터에 착색된 면적( $S$  cm<sup>2</sup>)으로 나누어준 값으로, 이 값은 광행로(optical pathlength)를 대변한다. 광행로란 해수 내에서 광이 통과한 경로를 의미하는 것으로서, 직접적으로 측정하는 것이 불가능하기 때문에 위와 같은 방법으로 계산하였다. "β"라는 값(여기서

는 2)은 광 증폭 효과 (β-effect ; Kiefer and SooHo, 1982)로서, 부유입자 상태에서 측정된 흡광 계수 값과 필터를 이용하여 측정된 흡광 계수 값과의 비 값이다. 일반적으로 필터를 이용하여 측정된 흡광 계수 값이 부유입자 상태에서 측정된 흡광 계수 값보다 약 2배 정도의 큰 값을 갖는다(Ahn, 1990). 이 현상의 원인은 입자가 필터 위에 놓여 있을 때, 필터와 입자간의 상호작용 및 필터의 광분산에 의한 광행로차의 증폭에 기인한다.

$a_{dom}(\lambda)$ 을 측정하기 위하여, pore size가 0.45 μm인 멤브레인 필터를 사용하여 채수한 해수를 여과하였다. 여과된 해수를 10 cm optical cell에 넣고 부유상태에서 spectrophotometer를 이용하여 파장 400 - 750 nm까지 스캐닝하여 O.D를 측정하였다.  $a_{dom}(\lambda)$ 은 다음과 같이 계산하였다.

$$a_{dom}(\lambda) = \frac{O.D_{dom}(\lambda) \times 2.3025}{0.1} \quad (12)$$

### 2.2. $R_{rs}(\lambda)$ (unit: sr<sup>-1</sup>) 측정

그림2에 묘사된 것과 같이 ASD사의 dual spectroradiometer를 사용하여  $E_d$ 와 대기광량 (Sky radiance,  $L_{sky}$ ), 총수출광량 (total water leaving radiance,  $L_{wT}$ )을 측정하였다.

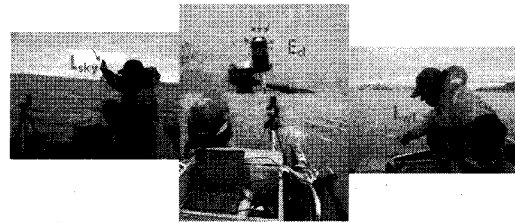


그림2. ASD사의 dual spectroradiometer를 이용하여 선상에서 AOPs를 측정하는 모습

$L_w$ 는 해수표면에 형성된 물과 대기의 경계면을 통과하여 나오는 해수 수피로부터

터 반사된 광량이며,  $L_w(\lambda)$ 와  $R_{rs}(\lambda)$ 는 다음과 같이 계산하였다.

$$L_w(\lambda) = L_{wT}(\lambda) - \{L_{sky}(\lambda) \times F_r(\lambda, \theta)\} \quad (13)$$

$$R_{rs}(0^+, \lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(0^+, \lambda)} \quad (14)$$

여기서,  $F_r(\lambda, \theta)$ 는 Fresnel reflectance 값으로써, 파장( $\lambda$ )과 입사각( $\theta$ )의 함수이지만 본 연구에서는 파장에 관계없이 입사각이 30°일 때의 값 0.025로 일정하다고 가정하였다.

### 2.3. $a_w(\lambda)$ (unit: $m^{-1}$ )

Pope and Fry (1997)에서 제공된 파장 380 - 730 nm에 대한  $a_w(\lambda)$  값을 사용하였다(그림3).

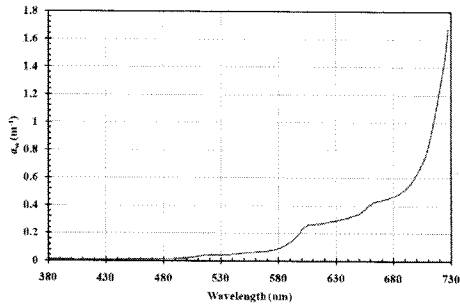


그림3. 파장에 따른  $a_w(\lambda)$  스펙트럼 (Pope and Fry, 1997)

## 3. 결과

### 3.1. $R_{rs}(\lambda)$ 와 총합 $a(\lambda)$ 의 상관관계

그림4는 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm에서  $R_{rs}(\lambda)$ 와 성분별 흡광계수 총합  $a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_{ss}(\lambda) + a_{dom}(\lambda)$ 의 상관관계를 분석한 그림들이다. x축은 총합  $a(\lambda)$ , y축은  $R_{rs}(\lambda)$ 이다. 파장별 상관도 ( $R^2$ )는 각각 0.724, 0.717, 0.650, 0.548이고,  $R_{rs}(\lambda)$  값이 감소할수록 총합  $a(\lambda)$  값이 반비례적으로 급격하게 증가하는 성향을 보였다.

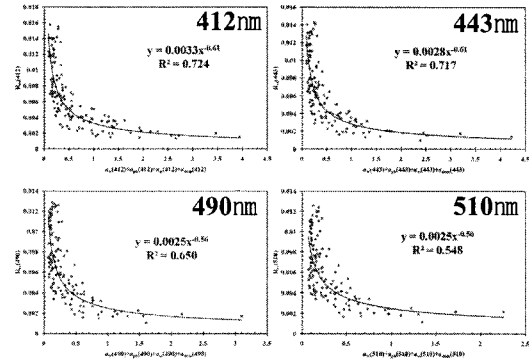


그림4. 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm에서  $R_{rs}(\lambda)$ 와  $a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_{ss}(\lambda) + a_{dom}(\lambda)$ 와의 상관관계

### 3.2. 경험적 $a_{ph}(\lambda)$ 산출 알고리즘

$a_{ph}(\lambda)$  산출 알고리즘은 엽록소의 흡광과 관련된 파장 490 nm와 부유물의 산란과 관련된 파장 555 nm의  $R_{rs}(\lambda)$  밴드비를 이용하여 경험적인 방법으로 개발되었고 그 식은 다음과 같다.

$$a_{ph}(\lambda) = \alpha \left( \frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)} \right)^\beta \quad (15)$$

$\lambda$	$\alpha$	$\beta$
412 nm	0.083	-2.96
443 nm	0.087	-2.73
490 nm	0.060	-2.73
510 nm	0.044	-2.90
555 nm	0.023	-2.91
670 nm	0.042	-2.84

그림5는 개발한 알고리즘들로부터 산출한 파장별  $a_{ph}(\lambda)$ 와 현장관측한  $a_{ph}(\lambda)$ 의 RMS를 분석한 그림들이다. 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm, 555 nm, 670 nm에 대한 RMS 값은 각각 0.229, 0.223, 0.227, 0.230, 0.260, 0.268로 대체적으로 모델값이 현장값보다 높았다. RMS 값은 다음과 같이 계산하였다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\log_{10}(a_m) - \log_{10}(a_o))^2}{N}} \quad (16)$$

여기서,  $a_m$ 은 알고리즘에서 산출된  $a_{ph}(\lambda)$  값이고  $a_o$ 는 현장관측자료  $a_{ph}(\lambda)$  값이다.

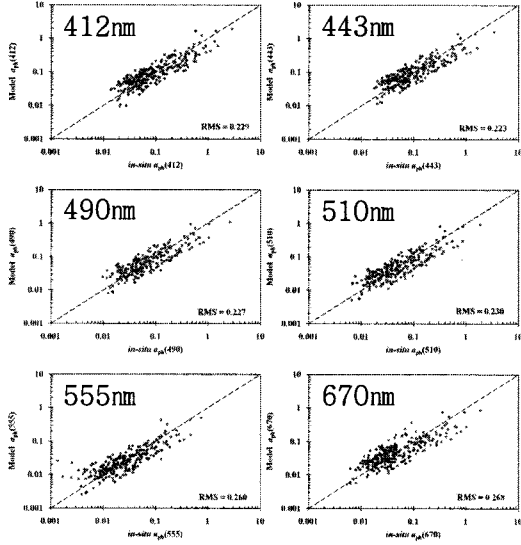


그림5. 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm, 555 nm, 670 nm에 따른 각각의 *in-situ*  $a_{ph}(\lambda)$ 와 Model  $a_{ph}(\lambda)$ 와의 RMS 분석

### 3.3. 경험적 $a_{ss}(\lambda)$ 산출 알고리즘

$a_{ss}(\lambda)$  산출 알고리즘은 용존유기물의 흡광과 관련된 파장 412 nm와 부유물의 산란과 관련된 파장 555 nm의  $R_{rs}(\lambda)$  밴드비를 이용하여 개발하였고 그 식은 다음과 같다.

$$a_{ss}(\lambda) = \alpha \left( \frac{R_{rs}(412)}{R_{rs}(555)} \right)^\beta \quad (17)$$

$\lambda$	$\alpha$	$\beta$
412 nm	0.087	-2.17
443 nm	0.065	-2.15
490 nm	0.042	-2.12
510 nm	0.035	-2.10
555 nm	0.023	-2.14
670 nm	0.012	-1.78

그림6은 개발한 알고리즘들로부터 산출한 파장별  $a_{ss}(\lambda)$ 와 현장관측한  $a_{ss}(\lambda)$ 의 RMS를 분석한 그림들이다. 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm, 555 nm, 670 nm에

대한 RMS 값은 각각 0.324, 0.324, 0.333, 0.338, 0.361, 0.343로 대체적으로 모델값이 현장값보다 높았다.

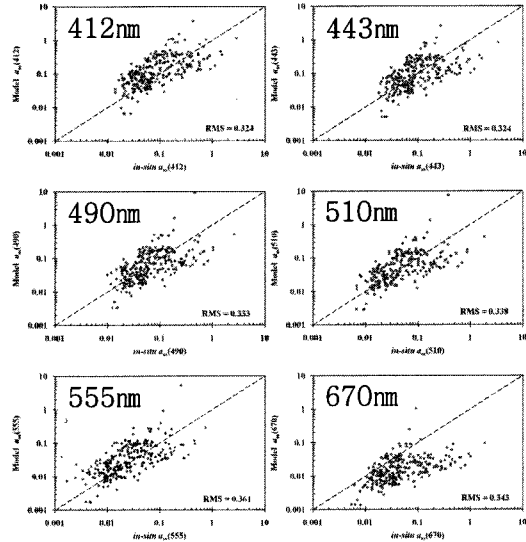


그림6. 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm, 555 nm, 670 nm에 따른 각각의 *in-situ*  $a_{ss}(\lambda)$ 와 Model  $a_{ss}(\lambda)$ 와의 RMS 분석

### 3.4. 경험적 $a_{dom}(\lambda)$ 산출 알고리즘

$a_{dom}(\lambda)$  산출 알고리즘은 용존유기물의 흡광과 관련된 파장 412 nm와 부유물의 산란과 관련된 파장 555 nm의  $R_{rs}(\lambda)$  밴드비를 이용하여 개발하였고 그 식은 다음과 같다.

$$a_{dom}(\lambda) = \alpha \left( \frac{R_{rs}(412)}{R_{rs}(555)} \right)^\beta \quad (18)$$

$\lambda$	$\alpha$	$\beta$
400 nm	0.236	-1.34
412 nm	0.205	-1.34

그림7은 개발한 알고리즘들로부터 산출한 파장별  $a_{dom}(\lambda)$ 와 현장관측한  $a_{dom}(\lambda)$ 의 RMS를 분석한 그림들이다. 파장 400 nm, 412 nm에 대한 RMS 값은 각각 0.237, 0.230로 대체적으로 모델값이 현장값보다 높았다.

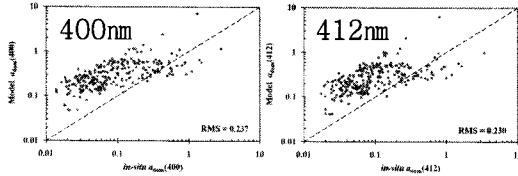


그림7. 파장 400 nm, 412 nm에 따른 각각의 *in-situ*  $a_{dom}(\lambda)$ 와 Model  $a_{dom}(\lambda)$ 와의 RMS 분석

### 3.5. $a_{ph}(\lambda)$ , $a_{ss}(\lambda)$ , $a_{dom}(\lambda)$ 스펙트럼

그림8은 알고리즘으로부터 산출된 파장에 따른  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_{ss}(\lambda)$ ,  $a_{dom}(\lambda)$ 의 스펙트럼들을 재현한 그림이다.  $a_{ph}(\lambda)$ 는 파장 443 nm에서 엽록소 최대흡광 peak, 파장 490 nm에서 엽록소 흡광 peak, 파장 670 nm에서 엽록소 형광 peak가 잘 표현된 스펙트럼 형태를 보였다.  $a_{ss}(\lambda)$ 는 파장이 증가할수록 완만한 기울기의 형태로 흡광 값이 감소하는 전형적인 스펙트럼 형태를 잘 표현하였다.  $a_{dom}(\lambda)$  스펙트럼은 다음과 같은 식을 이용하였다(Bricaud *et al.*, 1981).

$$a_{dom}(\lambda) = a_{dom}(\lambda_0) e^{-S(\lambda - \lambda_0)} \quad (19)$$

여기서,  $\lambda_0$ 는 기준파장이고, S는 기울기이다.

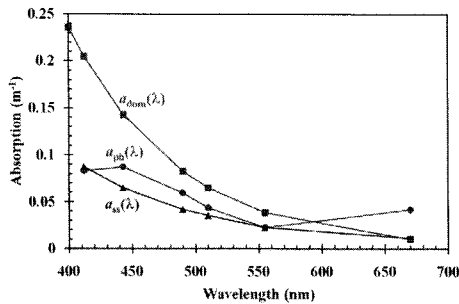


그림8. 알고리즘으로부터 산출된 파장에 따른  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_{ss}(\lambda)$ ,  $a_{dom}(\lambda)$ 의 스펙트럼 재현

## 4. 결론 및 고찰

한반도 주변 해역에서 현장관측한 IOPs와 AOPs 자료들을 이용하여  $R_{rs}(\lambda)$ 와 총합  $a(\lambda)$ 의 상관관계를 분석하고, 경험적인 방법으로  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_{ss}(\lambda)$ ,  $a_{dom}(\lambda)$  산출 알고리즘

을 개발하였다.  $R_{rs}(\lambda)$ 와 총합  $a(\lambda)$ 는 반비례적인 상관관계를 보였고 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm일 때 상관도는 각각 0.724, 0.717, 0.650, 0.548이다.  $a_{ph}(\lambda)$  산출 알고리즘은 엽록소의 흡광과 관련된 파장 490 nm와 부유물의 산란과 관련된 파장 555 nm의  $R_{rs}(\lambda)$  밴드비의 함수 형태로 개발하였고, 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm, 555 nm, 670 nm일 때 RMS 값은 각각 0.229, 0.223, 0.227, 0.230, 0.260, 0.268이다.  $a_{ss}(\lambda)$ 와  $a_{dom}(\lambda)$  산출 알고리즘은 용존유기물의 흡광과 관련된 파장 412 nm와 부유물의 산란과 관련된 파장 555 nm의  $R_{rs}(\lambda)$  밴드비의 함수 형태로 각각 개발하였다. 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm, 555 nm, 670 nm일 때  $a_{ss}(\lambda)$ 의 RMS 값은 각각 각각 0.324, 0.324, 0.333, 0.338, 0.361, 0.343이다. 파장 400 nm, 412 nm일 때  $a_{dom}(\lambda)$ 의 RMS 값은 각각 0.237, 0.230이다.

본 연구에서 경험적인 방법으로 개발된  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_{ss}(\lambda)$ ,  $a_{dom}(\lambda)$  산출 알고리즘들은 현장값보다 조금 높게 추정하였고 각 성분별 흡광계수의 스펙트럼들은 잘 재현해냈다. 추후 이에 대한 개선과 알고리즘의 검보정이 요구된다.

## 5. 참고문헌

- Bricaud, A., A. Morel, and L. Prieur, 1981. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains, *Limnology and Oceanography*, 26(1): 43-53.
- Lee, Z. P., K. L. Carder, R. G. Steward, T. G. Peacock, C.O. Davis, and J. S. Patch, 1998. An empirical algorithm for light absorption by ocean water based on color, *Journal of Geophysical Research*, 103(C12): 27967-27978.
- Pope, R. M. and E. S. Fry, 1997. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements, *Applied Optics*, 36(33): 8710-8723.