

탁한(CASE-II) 해수의 클로로필 분석 알고리즘의 개발 Development of chlorophyll algorithms in turbid(CASE-II) waters

안유환*, 이홍재, 문정언
한국해양연구원 기후환경연구본부
yhahn@kordi.re.kr

부유물이 해수의 광특성을 좌우하는 탁한 해수의 해색 분석 알고리즘을 개발하기 위하여 해수의 CASE-II water 원격반사도 모델이 개발되었다. 개발된 원격반사도 모델은 현장관측 자료와 비교 검증되었으며, 모델의 결과를 활용하여 지금까지의 단순 2 band ratio의 클로로필 알고리즘보다 발전된, 즉 부유물 농도의 함수로 새로운 개념의 알고리즘 개발이 시도하였다. 새 해색 클로로필 알고리즘을 SeaWiFS 위성 자료에 적용한 결과 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

1. 서론

전 세계 해양의 대부분은 맑은 해수(CASE-I water)이다. 그러므로 지구 규모적으로 해양의 일차생산량의 지수인 클로로필 농도 값을 산정 하는 데는 큰 문제가 없다. 그러나 수산 활동이나 해양의 활용성이나 경제성을 고려한다면 연안해역을 간과할 수는 없을 것이다. 특히 우리나라의 경우 남해, 황해 및 연안 해역의 중요성은 원 해양에 비하여 오히려 더 큰 비중을 두어도 과하지 않을 것이다. 그러므로 해색 원격탐사에서 비록 면적으로는 원 해양에 비하여 차지하는 비중이 낮으나 이를 무시한 원격탐사는 있을 수 없다. 현재 많은 해양 광학자들 이나 해색 원격탐사 전문가는 서로 다투어 탁한 해수(CASE-II water)에서 해색분석 알고리즘을 개발하기 위하여 엄청난 연구가 수행되고 있다. 특히 황해는 바로 CASE-II water의 대표적인 해역으로 최근 중국, 일본 혹은 미국 ONR의 지원으로 관심의 대상이 되고 있다.

현재까지 알려진 내용은 연안의 육상기원 부유사나 저층 침전물의 재 부상에 의한 부유물질은 정상적인 해색분석 알고리즘을 교란하여 현재까지의 맑은 해수에 적용하는 알고리즘을 연안해역에 적용할 수 없다는 것으로 규명되고 있다. 특히 우리의 서해는 황사나 연안의 조석현상으로 부유사의 영향이 최고조에 달하여 정상적인 해색분석으로 클로로필 농도를 구하는 것은 거의 불가능하다. 물론 황해의 춘계 bloom이 발생하는 경우는 일시적으로 식물성 플랑크톤이 광특성을 좌우하는 CASE-I water로 잠시 변하기도 한다.

본 연구에서는 어떻게 이 부유사가 해색 알고리즘에 어떠한 영향을 미치며, 현장 관측에 의한 그 알고리즘과 모델에 의한 결과를 비교하여 그 원인과 앞으로 개선의 방향을 알아보는데 그 주안점을 두었다.

2. 방법

가. 현장관측

1999년 2000년 8월까지 한반도의 연안 해역 (남해에서부터 서해연안)을 중심으로 현장해

수의 광학적 인자 값을 측정하였다. Water leaving radiance(L_w), downwelling irradiance(E_d) 및 sky radiance(L_{sky})를 파장 400nm에서 900nm까지 2nm 간격으로 ASD사의 Dual direction field spectrometer로 사용하여 측정하였다. 그리고 현장 해수의 클로로필 농도($\langle chl \rangle$), 총부유물량(SS) 및 용해유기물의 흡광도를 측정하였다. 광학적 측정값은 원격반사도(R_{rs})나 규격화된 해수의 수출광량(L_{wN})으로 전환하였고 현장 측정된 클로로필량과 비교하여 경험적인 관계식을 유도하였다. 그리고 해수의 반사도 모델(Ahn, 1999, 2000)을 사용하여 그 결과와 비교하여 보았다.

나. 모델의 입력

CASE-II water의 R_{rs} 스펙트럼을 발생시키기 위하여 일반적인 연안 해수에 포함된 물질 농도를 그대로 활용하였다. 그리고 진도 완도 근해의 극단적인 탁수 해수를 그대로 표현하려고 다음과 같은 값을 입력하였다. 클로로필의 농도는 연안에서 흔히 볼 수 있는 정도의 최대 농도 10mg/m^3 를 입력하였다.

입력 Parameters	모델	CASE-II water
클로로필 농도		$0.5 - 10\text{mg/m}^3$
SS 농도		$2 - 100\text{g/m}^3$
DOM(400nm)		$0.1 - 1.0\text{m}^{-1}$

3. 결과 및 토의

가. 현장관측 결과

Remote reflectance는 해색 알고리즘의 기본 parameter로 지금까지 많은 경험적 알고리즘이 개발되었다. 사용하는 band는 클로로필의 흡수 파장대로 445nm, 490nm, 520nm 그리고 비흡수 파장대로 555nm를 사용하고 있다. 일반적인 알고리즘은 다음과 같은 경험적인 식을 사용한다.

$$\langle chl \rangle = A \left\{ \frac{R_{445,490}}{R_{555}} \right\}^{-B} \tag{1}$$

위에서 A와 B는 경험적으로 얻어지는 상수이고, R은 water leaving radiance나 혹은 (remote sensing) reflectance를 의미한다. 현재 이러한 경험식은 Case-I water에만 유효하다고 할 수 있지만 단순하면서도 그 오차가 크지 않아서 현재 NASA의 SeaWiFS 표준도 역시 이러한 알고리즘을 채택하고 있다. 다음 식은 SeaBAM working group에서 추천하여 채택한 SeaWiFS 클로로필 알고리즘 (OC2 : SeaDAS¹⁾ S.W내 IDL code 명) 이다

$$\langle Chl \rangle = -0.040 + 10^{(0.341 - 3.001 \cdot X + 2.811 \cdot X^2 - 2.041 \cdot X^3)} \tag{2}$$

1) SeaWiFS Data Analysis System의 약어로 NASA에서 SeaWiFS 자료 처리를 위하여 만든 software 임.

위 식에서 $X = \log_{10} [R_{rs}(490)/R_{rs}(555)]$ 이다. 클로로필 흡수 band를 490nm 사용하는 이유는 445 nm는 광합성 색소의 peak 흡수대이므로 클로로필 농도가 너무 높으면 이 band의 신호의 세기가 너무 약하여 오히려 불안정한 radiance 값을 얻을 수 있기 때문이다. SeaBAM에서는 chlorophyll 농도가 $1.5\mu\text{g}/\ell$ 보다 약한 해역에서는 $R_{rs}(445)/R_{rs}(555)$ 비 값을 사용할 것을 권하고 있다. 다음 식은 2 bands 비값 값을 활용한 알고리즘이다 (OC2a).

$$\langle Chl \rangle = -0.0815 + 10^{(0.1909 - 1.9961 \cdot X + 1.3020 \cdot X^2 - 0.5091 \cdot X^3)} \quad (3)$$

Fig. 1은 관측 모든 해역에서 remote reflectance의 비 값과 chlorophyll의 농도를 앞의 NASA 표준 CASE-I water SeaWiFS 알고리즘 식 (2)와 (3)을 비교하여 나타내었다. 그림에서 현 알고리즘의 문제점을 분석하여 보면 예상한대로 적조발생해역(high chlorophyll region; 진해만)과 탁수해역(turbid water; 진도-완도)에서 상황이 역전되는 현상이 보인다.

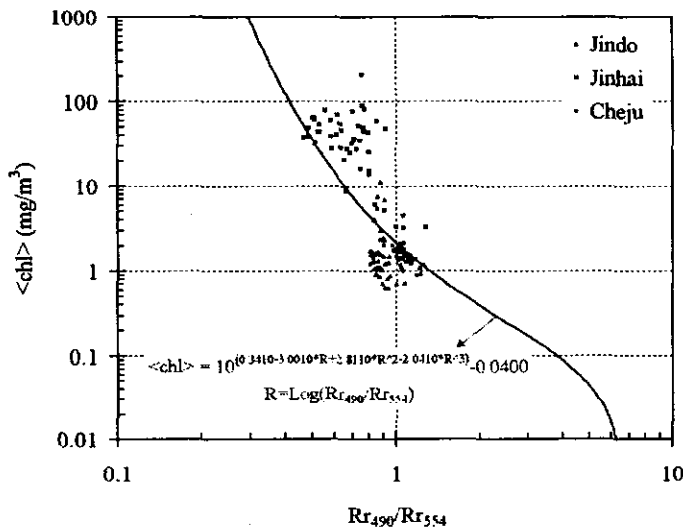


Fig. 1. Remote reflectance ratio, $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$, plotted vs. *in-situ* pigment concentration.

즉 SeaBAM 추천 NASA의 표준 알고리즘은 CASE-I water를 위하여 만들어졌다. 고농도의 해역에서는 2가지 알고리즘 모두 현장 값보다 적게 계산한다는 것이다. 반면에 탁수해역에서는 현장 값보다 크게 계산한다는 결론을 얻는다. 그래도 CASE-I water의 성질에 가까운 제주 해협에서는 기존의 알고리즘과 잘 일치하고 있다. 이러한 오차는 CASE-II 해수 중에 다량으로 존재하는 부유물과 용해유기물이 만든다는 것은 잘 알려져 있고, Ahn *et al.* (1997)의 최근에 연구결과에서 잘 규명되고 있다. 한가지 예상을 벗어나는 현상으로는 적조 발생해역의 위성에 의한 클로로필 알고리즘은 현장 값보다 크게 계산할 것으로 추측하였으나 예상외로 작게 계산하였다. 이곳 해역이 [클로로필농도-부유물 총량] 관계에서 일부 CASE-I water와 상당 부분이 CASE-II water로 분류되었다. 이 사실은 이곳 해역이 부유물 농도가 CASE-I water에 비하여 상대적으로 높음을 증명하는 것이긴 하지만 또 다른 영

향을 미치는 변수가 작용하였으리라 사료된다. <chl> 값을 낮게 계산할 수 있는 원인은 $R_{rs}(445, 490nm)/R_{rs}(555nm)$ 비 값이 높게 측정되었음을 의미한다. 이것은 $R_{rs}(445, 490nm)$ 가 크게 측정되었거나 $R_{rs}(555nm)$ 가 작게 측정되었기 때문이다. 현재로는 CASE-II water의 고 농도 클로로필 해역에서 클로로필 값이 현장치 보다 과소하게 분석되어지는 이유는 알 수 없다. 우리는 이러한 클로로필 알고리즘에 오차를 주는 부유물과 용해 유기물의 양을 먼저 알아내는 기술이 필요하다고 사료된다. 그러므로 탁수-적조 해석 알고리즘 개발의 과정으로 CASE-II water의 광학적 모델링이 필요하며 이어서 총 부유물 량 알고리즘을 구하고 이를 바탕으로 클로로필 알고리즘을 개발하는 과정이 되겠다.

나. NC 입자가 chlorophyll 알고리즘에 미치는 영향

해수 중 부유사 입자의 영향으로 전 파장에 걸쳐서 R_{rs} 의 값이 높아졌다. 특히 장파장대로 갈수록 이 값은 단파장에 비하여 상대적으로 더욱 증가되었다. 이 결과는 다음 Fig. 2로 증명된다. 다음 그림은 R_{rs444}/R_{rs554} band 비 값을 클로로필 농도에 따라 그 분포를 나타내었고 정상적인 CASE-I water의 클로로필 알고리즘을 동시에 보여주고 있다. 같은 클로로필 농도에서 CASE-II water에서는 이 2 band 비 값이 상당히 낮아졌다. 그러므로 탁한 해수의 경우 CASE-II water 알고리즘을 적용할 수 없음이 다시 증명되는 셈이다.

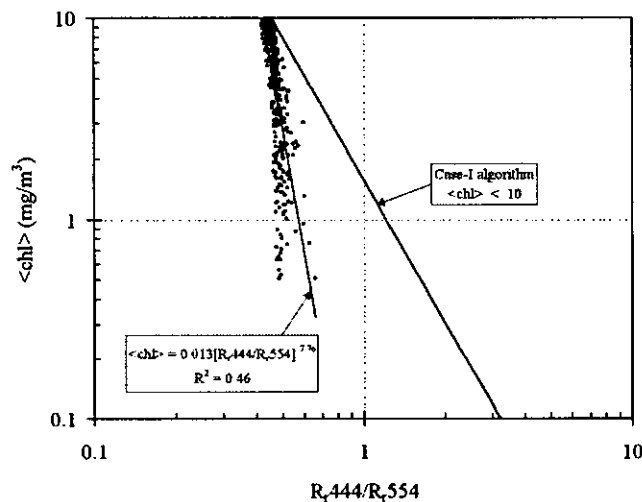


Fig. 2. Comparison of chlorophyll algorithm between the CASE-I water and the CASE-II water algorithm (scattered points) by model for R_{rs} ratio at 444/555nm.

예를 들어보면, 만약 CASE-II water에서 R_{rs444}/R_{rs554} 값 0.5를 얻은 경우를 생각해보자. 실제 클로로필의 농도는 $2.8mg/m^3$ 이다. 그러나 CASE-I 알고리즘이 적용되면 클로로필 농도는 $8.1mg/m^3$ 로 계산된다. 이러한 현상은 클로로필의 농도가 고농도 $10mg/m^3$ 정도로 가면 오차가 점차 축소되는 경향을 보여준다. 그리고 해수 중 부유물에 의하여 R_{rs444}/R_{rs554} 의 미소 변화에 대하여 클로로필 농도는 크게 변한다는 것이다. 이러한 알고리즘 기율기 증가는 위성자료 분석용의 실질적인 알고리즘으로 채택하여 사용하기 어렵게 만든다. 그것은 클로로필 농도의 변화가 $0.5 - 10mg/m^3$ 까지 최대/최소가 약 20배정도 변할 때 R_{rs444}/R_{rs554} 값의 최소와 최대의 변동폭이 2배도 되지 않는다 ($0.4 - 0.7$). 가장 이상적인 것은 클로로필의 변동범위나 R_{rs} 의 변동 범위가 같은 1:1인 경우이다. 어쨌든 모델에 의하여 얻어진 CASE-II water 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

다. 모델에 의한 CASE-II Chlorophyll 알고리즘

현장 모델에 의한 클로로필 알고리즘은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\langle Chl \rangle [mg/m^3] = 0.12 \left[\frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)} \right]^{-9.20} \quad (4)$$

$$\langle Chl \rangle [mg/m^3] = 0.160 \left[\frac{nL_w(490)}{nL_w(555)} \right]^{-9.20} \quad (5)$$

라. 개선된 CASE-II water chlorophyll algorithm

아래 식은 모델에 의하여 얻어진 것으로, SS의 농도(안 등, 1999)에 따른 클로로필 값을 나타낸 것이다.

$$\langle chl \rangle = 0.49 \left[\frac{R_{rs}(490) - (0.0059 \log \langle SS \rangle - 0.0126)}{R_{rs}(555) - (0.0085 \log \langle SS \rangle - 0.0161)} \right]^{-9.65} \quad (6)$$

4. 결론

부유물이 클로로필 알고리즘에 미치는 영향은 현장 관측치 보다 월등하게 높은 농도로 분석된다는 것이다. 2 bands ratio 알고리즘에서는 부유물 농도가 높을수록 555nm의 반사도가 490nm에서보다 상대적으로 세어짐에 따라 원격반사도 490nm/555nm 비 값이 저하되어 큰 농도 값을 주게된다. 그러나 이 CASE-II water 알고리즘이 적용되기 위하여서는 먼저 해당 해역이 CASE-II water라는 검증을 거쳐야 한다. 그러므로 본 연구에서 얻어진 결과는 엄격하게 CASE-II water에만 적용되어야 할 것이다. 만약 CASE-II water에서 CASE-I water로 연속적으로 변하는 해역에서는 적용되어서는 안 된다는 문제점을 갖고 있으므로 2 해수에 동시에 적용 가능한 알고리즘의 개발이 앞으로의 연구과제가 될 것이다. 본 연구에선 처음으로 이 문제 해결을 위한 부유사의 농도를 먼저 구하고 이 농도 값을 고려한 클로로필 알고리즘이 개발되었다. 이 방법은 아주 현재까지는 사용된 적이 없는 독특한 방법으로, 앞으로 좀더 많은 현장 검증과정으로 개선이 필요하다고 사료된다

참고문헌

- Ahn Y. H., 1999. Development of an inverse model from ocean reflectance. *Marine*.
- Ahn Y. H. H. J. Lie and J. M. Moon, 1999. Variation of water turbidity in Korean waters. <Proceeding of International Symposium on Progress in Coastal Engineering and Oceanography>. Vol. 1, 45 - 53p.
- Ahn Y. H. 2000. Development of Remote Sensing Reflectance and Water Leaving Radiance Models for Ocean Color Remote Sensing Technique. *Journal of the KSRS*. Vol 16. No. 3. 240-260p.