Jour. Korean Earth Science Society, v. 30, no. 2, p. 234-246, April 2009

동해 SeaWiFS 클로로필-a 농도의 스펙클 오차 특성

채화정[1] · 박경애[1,2,*]

[1]서울대학교 과학교육과, 151-742, 서울특별시 관악구 신림동 관악로 599
[2]서울대학교 지구과학교육과/해양연구소, 151-742, 서울특별시 관악구 신림동 관악로 599

Characteristics of Speckle Errors of SeaWiFS Chlorophyll-*a* Concentration in the East Sea

Hwa-Jeong Chae[1] and Kyung-Ae Park[1,2,*]

[1]Department of Science Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
[2]Department of Earth Science Education/Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

Abstract: Characteristics of speckle errors of Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) chlorophyll-*a* concentration were analyzed, and its causes were investigated by using SeaWiFS data in the East Sea from September 1997 to December 2007. The speckles with anomalously high concentrations were randomly distributed and showed remarkably high bias of greater than 10 mg/m^3, compared with their neighboring pixels. The speckles tended to appear frequently in winter, which might be related to cloud distribution. Ten-year averaged cloudiness of winter was much higher over the southeastern part, with frequent speckles, than the northwestern part of the East Sea. Statistical analysis results showed that the number of the speckles was increased as cloudiness increased. Normalized water-leaving radiance of the speckle pixel was considerably low at the short wavelengths (443, 490, and 510 nm), whereas the radiance at 555 nm band was normal. These low measurements produced extraordinarily high concentration from the chlorophyll-*a* estimation formula. This study presented the speckle errors of SeaWiFS chlorophyll-*a* concentration in the East Sea and suggested that more reliable chlorophyll-*a* data based on appropriate ocean color remote sensing techniques should be used for the oceanic application researches.

Keywords: ocean color remote sensing, chlorophyll-*a* concentration, speckle error, SeaWiFS

요 약: 1997년 9월부터 2007년 12월까지 동해의 SeaWiFS 자료를 이용하여 SeaWiFS 클로로필-*a* 농도가 가지는 스펙클 오차의 특성을 분석하고 그 원인을 조사하였다. 비정상적으로 큰 농도를 가진 스펙클들은 산발적으로 분포하였으며, 주변 화소들과 비교하였을 때 10 mg/m^3 이상의 현저하게 큰 편차를 보였다. 이 스펙클들은 겨울철에 자주 나타나는 경향이 있었으며, 이는 구름 분포와 관련이 있을 수 있다. 10년 평균된 겨울철 운량은 동해 북서쪽보다 스펙클이 자주 출현하는 남동쪽에서 더 크게 나타났다. 통계적 분석 결과는 운량이 증가할수록 스펙클의 수가 증가하는 것을 보여주었다. 스펙클 화소의 정규화된 수출광량은 단파장 영역(443, 490, 510 nm)에서 상당히 낮았으나 555 nm 파장대는 정상적이었다. 이러한 낮은 관측치들은 클로로필-*a* 산출 식에서 비정상적으로 큰 농도를 생산하였다. 본 연구는 동해의 SeaWiFS 클로로필-*a* 농도자료가 지니는 스펙클 오차에 대한 문제점을 제기하였으며, 적절한 해색 원격탐사 기술을 활용한 좀 더 신뢰도 있는 클로로필-*a* 자료를 해양 응용 연구에 사용해야 함을 제시하였다.

주요어: 해색원격탐사, 클로로필-*a* 농도, 스펙클 오차, SeaWiFS

*Corresponding author: kapark@snu.ac.kr
Tel: 82-2-880-7780
Fax: 82-2-874-3289

서 론

해색 원격탐사(Ocean Color Remote Sensing)는 파장이 0.4-0.7 μm 범위에 있는 가시광이 해수 수괴에 반사되어 되돌아 나오는 반사도를 측정하여 해수색의 변화를 관측하는 기술로 해수 중에 포함되어 있는 다양한 물질의 종류와 양을 측정한다. 이는 광범위한 공간 범위에서 일어나는 해색 변화를 동시에 파악할 수 있어서, 많은 연구자들에게 전 지구 규모나 지역 규모에 대한 해양 표층의 식물 플랑크톤 증식을 연구하는데 중요하다(Banse and English, 1994). 또한 해색 관측은 해양 기초 생물자원 양을 측정할 수 있을 뿐 아니라 해수 내 이산화탄소 농도를 관측할 수 있어 지구 규모로 장기적인 지구 기후변화에서 해양의 역할 규명에 기여할 수 있다(O'Reilly et al., 1998).

해색 관측 위성으로는 1978년 Nimbus-7에 탑재된 Coastal Zone Color Scanner(CZCS)가 있으며, 최근 10년 동안에는 1997년에 발사된 해색 센서 SeaWiFS, 2002년에 발사된 Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS)가 있다. 이중에서 SeaWiFS가 널리 활용되고 있으며, 관측된 자료들은 National Aeronautics and Space Administration/Ocean Biology Processing Group(NASA/OBPG)를 통하여 사용자들에게 배포되고 있다. 이들 자료 중 월별 합성 또는 주간 합성된 Level-3 자료가 주로 활용되고 있다.

식물성 플랑크톤은 주로 봄·가을에 번성하고 특히 수심이 얕거나 육지의 영향을 받는 연안주변에서 큰 농도로 나타난다. 그런데 SeaWiFS에서 관측된 클로로필-*a* 농도 Level-3 자료를 보면 농도가 낮게 나타나는 시기의 외해에서 비정상적으로 큰 값이 스펙클(speckle)로 나타난다. 이런 스펙클들은 산발적으로 분포하며 매우 큰 값을 가져 클로로필-*a* 농도자료에 오차를 유발한다. 그럼에도 많은 연구자들이 클로로필-*a* 농도자료에 대한 오차 특성을 고려하지 않고 NASA/OBPG에서 처리되고 배포된 자료를 그대로 사용하고 있다. 따라서 본 연구는 해양 표층의 식물 플랑크톤 증식과 다양한 해양 현상을 이해하고 연구하는데 널리 활용되고 있는 SeaWiFS 해색 센서의 클로로필-*a* 농도 Level-3 합성장이 지니고 있는 오차 특성을 분석하고 그 원인을 조사하는데 목적이 있다.

자료 및 방법

연구 자료

본 연구에 활용한 인공위성 자료는 NASA Goddard Space Flight Center에서 제공하는 SeaWiFS 센서의 자료 중에서 Level-2 Global Area Coverage(GAC) 자료와 Level-3 Standard Mapped Image(SMI)를 사용하였다. Level-2 GAC 자료는 디지털 신호 값의 보정(calibration)과 위치 보정(navigation)이 처리되어 있으며 4.5 km의 공간 해상도를 가진다. Fig. 1a는 하루 동안, Fig. 1b는 이틀 동안의 SeaWiFS 센서의 관측영역을 나타낸다. 이와 같이 이틀에 걸쳐 전 구규모의 자료를 획득하므로 우리나라 동해에는 보통

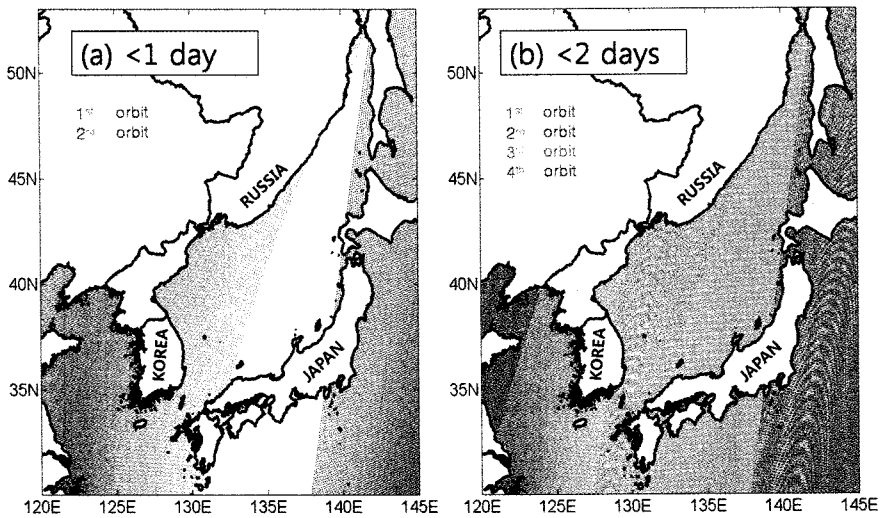

Fig. 1. Spatial and temporal coverage of SeaWiFS in the East Sea within (a) a day and (b) 2 days.

하루에 하나의 자료가 생성된다. Level-3 자료는 Level-2 자료를 시공간적으로 합성한 자료이다. 9 km ×9 km 영역 안에 관측된 모든 SeaWiFS 클로로필-*a* 자료에 통계적 처리를 하여 하루, 일주일, 한 달 등 주어진 시간 간격에 대한 시공간 합성장을 생산하여 SMI Level-3 자료 형태로 배포되고 있다(Campbell et al., 1995).

Level-2에서 Level-3로의 자료 합성은 가중치를 활용한 평균을 사용하는데 이는 식 (1)과 같이 최종 평균 합성장의 한 화소에 해당하는 9 km ×9 km 영역 안에 있는 모든 클로로필 자료들(x_{ij})을 공간 영역에서 합한 뒤, 그 자료 개수(x_{ij})에 대하여 시간 영역에서 다시 가중치를 각각 주어서 평균을 구하는 방법이다.

$$\bar{X}_{avg} = \frac{1}{W}\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{\sqrt{n_i}}\sum_{j=1}^{n_i}x_{ij},$$

$$W = \sum_{i=1}^{N}\sqrt{n_i} \qquad (1)$$

여기서 i는 시간, j는 공간을 나타내고 n_i는 i시간에서 최종 평균장의 한 화소 안에 관측된 자료의 개수를 의미한다. x_{ij}는 i시간에 j번째 공간에서 관측된 클로로필-*a* 농도이며 $\sqrt{n_i}$는 가중치, W는 가중치의 시간적 합이다. $\bar{X}_{avg}$는 가중치를 활용하여 평균한 시공간 합성장이다(Campbell et al., 1995; Antoine et al., 2004).

본 연구에서는 위도 34-52°N, 경도 127-143°E 범위의 동해를 연구해역으로 설정하였으며, 클로로필-*a* 농도 특성 및 오차 특성을 분석하기 위해 1997년 9월에서 2007년 12월까지 약 10년간 SeaWiFS 클로로필-*a* 농도 Level-3 월별 자료를 사용하였다. 오차 분석을 위하여 Level-2 자료도 활용하였다.

동해의 운량(cloudiness) 분석을 위해 National Oceanic and Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory(NOAA/ESRL)에서 제공하는 1°×1° 공간 해상도의 International Comprehensive Ocean-atmosphere Data Set(ICOADS) 자료 중 1998년 1월부터 2007년 5월까지 전체 약 10년간 월평균 운량 자료를 이용하였다. 연구 기간 동안의 고해상도 구름 영상 분석을 위하여 서울대학교 해양연구소(Research Institute of Oceanography, Seoul National University)에서 수신하고 처리된 NOAA-17 Advanced Very High Resolution Radiometer(AVHRR) 자료를 활용하였다.

클로로필-*a* 농도 산출

SeaWiFS 해색센서에는 6개의 가시 밴드(412, 443, 490, 510, 555, 670 nm)와 2개의 근적외 밴드(765, 865 nm)가 있으며 가시 밴드는 20 nm, 근적외 밴드는 40 nm의 밴드폭(band width)을 갖는다. 식물성 플랑크톤의 주 광합성 색소인 클로로필-*a*는 청색대(443-490 nm)와 적색대(670 nm) 파장의 빛을 선택적으로 흡수하므로 비교적 흡수가 적은 녹색대(555 nm)와 광량을 비교하여 클로로필-*a* 농도를 계산한다(O'Reilly et al., 1998).

1978년 CZCS 이후로 인공위성을 이용한 클로로필-*a* 농도를 구하는 많은 알고리즘이 개발되어 왔으며 이들 대부분은 현장 관측 자료와의 경험식으로부터 클로로필-*a* 농도를 산출한다. SeaWiFS에서 사용하는 경험식 알고리즘은 OC2와 OC4가 있다. 여기서 'OC'는 'Ocean Chlorophyll-*a*', 숫자는 알고리즘에 사용한 밴드 수를 의미한다. 현재 SeaWiFS 자료에 대하여 공식적으로 활용하고 있는 알고리즘은 식 (2)와 같이 OC4v4(OC4 version4)이다(O'Reilly et al., 2000).

$$Chl_a = 10^{(0.366-3.067R+1.930R^2+0.649R^3-1.532R^4)}$$

$$R = \log_{10}\left(\frac{R_{rs}443 > R_{rs}490 > R_{rs}510}{R_{rs}555}\right) \qquad (2)$$

Chl_a는 클로로필-*a* 농도, R_{rs}은 원격 반사도(remote sensing reflectance)이며 각 밴드간의 비율 중 가장 높은 R값을 사용하여 클로로필-*a* 농도를 구한다. 490 nm와 555 nm 두 개 밴드를 사용한 OC2 알고리즘이 클로로필-*a* 농도를 구하는 과정에서 정확도가 높으나, 클로로필-*a* 농도가 매우 낮을 때나 높을 경우에는 밴드 간 이동이 가능한 OC4를 사용하는 것이 적합하여 전구의 클로로필-*a* 농도를 산출하는데 OC4 알고리즘이 활용되고 있다. OC4v4는 알고리즘 갱신 과정에서 많은 현장 관측 자료를 이용하여 계수를 수정하고 있으나 맑은 해수(CASE I water)에 적합한 계산식이기 때문에 탁한 해수(CASE II water)에서는 오차가 관측되어 SeaWiFS 알고리즘에 대한 평가와 각 지역에 맞는 탁한 해수 알고리즘이 개발되고 있다(Sancak et al., 2005; Liew et al., 2001).

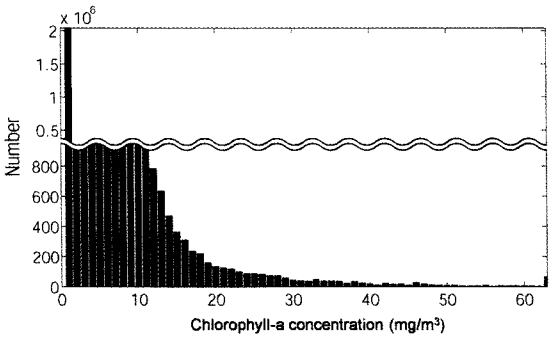

Fig. 2. Histogram of the chlorophyll-*a* concentration over the entire East Sea from September 1997 to December 2007.

연구 결과

스펙클의 분포 특성

Fig. 2는 클로로필-*a* 농도 화소의 빈도수를 도시한 것이다. 클로로필-*a* 농도는 0 mg/m^{3}에서 64 mg/m^{3}까지 다양하게 분포하지만 1-3 mg/m^3 범위에 대부분 분포하고 큰 농도범위에서는 지수 함수적으로 감소한다.

10년간 자료에서 클로로필-*a* 농도의 빈도수를 조사해 본 결과 10 mg/m^3 이하의 값이 99.74%를 차지하며 3 mg/m^3 이하의 값이 97.65%를 차지하였다.

일반적으로 클로로필-*a* 농도가 낮은 지역은 1 mg/m^3 이하로 나타나고 농도가 큰 범위의 빈도수는 매우 작다. 그러나 Level-3 월별 자료에서는 전체적으로 농도가 낮은 시기임에도 불구하고 주변 값에 비해 매우 높은 농도를 가진 화소가 스펙클 형태로 산발적으로 분포하며 클로로필-*a* 자료에 오차를 유발한다. Fig. 3은 SeaWiFS 센서에서 관측된 클로로필-*a* 농도 Level-3 월별 자료에서 스펙클이 나타나는 예시를 확대하여 나타낸 것이다. 붉은 점들이 비정상적으로 높은 농도를 가진 스펙클을 나타낸다. 이러한 비정상적으로 높은 클로로필-*a* 농도를 정량적으로 이해하기 위해 2002년 12월 Level-3 자료에서 스펙클이 나타나는 두 장소를 선택하고(Fig. 4) 주변 평균에 대한 스펙클 값의 비율과 편차를 구하여 Table 1에 나

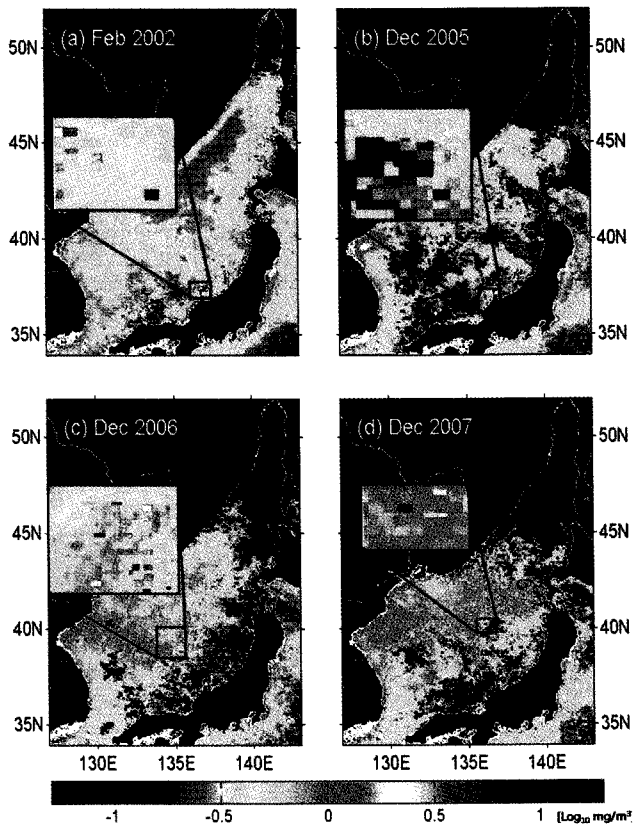

Fig. 3. Examples of anomalously high chlorophyll-*a* concentration (speckle) in (a) February 2002, (b) December 2005, (c) December 2006, and (d) December 2007.

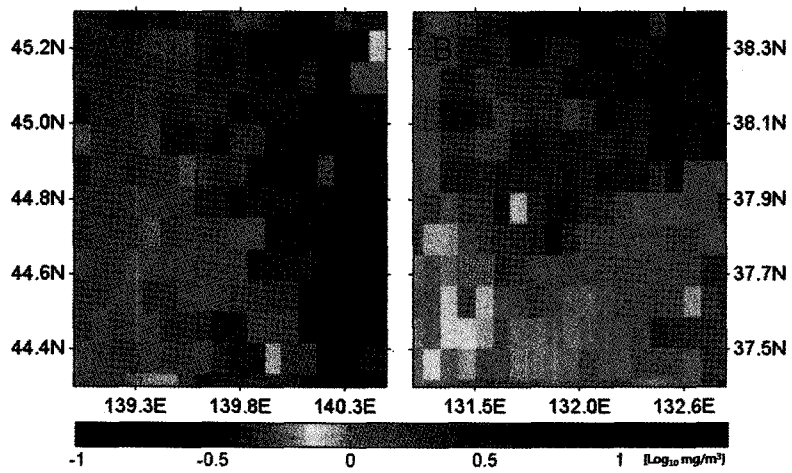

Fig. 4. Examples of speckle errors at two sites A and B in the East Sea.

Table 1. The ratio and deviation of the speckles from the mean values.

Site	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Ratio (Speckle/Normal)	Deviation (mg/m^3)
A	139.79	44.79	25.89	13.60
B	131.88	37.79	26.18	14.39

타냈다. 두 지역 모두 주변 평균값은 1 mg/m^3 이하였으나 스펙클 값은 주변 평균보다 약 25배의 값이 나타났으며 편차는 약 13 mg/m^3 이상을 보였다.

비정상적으로 높은 클로로필-*a* 농도의 특성을 공간적으로 분석해 보기 위해 약 10년 동안 연구 지역의 각 화소에서 최대 농도가 나타날 때의 값을 Fig. 5a에 로그 값으로 전환하여 도시하였다. 최대 농도는 주로 연안에서 10-60 mg/m^3까지 크게 나타나고 외해에서는 전체적으로 3 mg/m^3 이하의 작은 값이 주를 이루고 분포하였다. 연안과 멀리 떨어진 외해에서는 최대 농도값이 전반적으로 낮게 나타나나 주변 화소에 비해 매우 큰 농도가 주변과 연계성 없이 스펙클로 나타났다. Fig. 5의 확대한 그림에서 붉은 점이 매우 큰 농도로 나타나는 스펙클들이다. 각 화소마다 10년 자료 중에서 클로로필-*a* 농도가 10 mg/m^3 이상 나타나는 확률을 분석하여 스펙클이 일어나는 현상을 시간적으로 분석해 보았다(Fig. 5b). Fig. 5b에서는 연안에서만 확률이 크게 나타나고 외해에서는 매우 작기 때문에 색 범위(colorbar)를 0-3%로 조정하였다. Fig. 5a와 비교해 보면 최대 농도가 비정상적으로 큰 화소에서는 높은 농도가 나타나는 확률이 1% 이내로 낮게 나타났다. 즉, 각 화소에서 비정상적으로 큰 농도는 아주 드물게 나타나며 한번 나타날 때 매우 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 2002년 12월 한 달간의 Level-2 일별 자료에서 클로로필-*a* 농도가 10 mg/m^3 이상이 되는 값들의 확률을 분석해 본 결과 위에서 나타난 것처럼 1% 내외로 나타났다. 이는 식(1)에서처럼 Level-2 일별 자료가 시공간 합성된 Level-3 자료에서 나타나는 스펙클은 여러 번 클로로필이 번성하여 합성된 자료가 아니라 어느 한 시점에서 비정상적으로 높은 값을 가진 자료 때문에 나타난 현상이라고 해석할 수 있다. 물론 바다에서 만들어지는 소용돌이(eddy)에 의해서나 또는 생물학적인 조건이 충족되어 국지적으로 클로로필-*a* 번성이 일어날 수는 있지만, 비정상적으로 높은 클로로필 농도 값이 공간적으로 비연속적으로 나타날 뿐 아니라 시간적으로도 연계성이 없다는 것은 실제 자연현상에서 일어나는 값이라고 보기 어렵다.

연안으로부터 거리에 따른 특성

Fig. 6a는 바다 위의 한 지점으로부터 가장 가까운 해안선까지의 거리분포도를 도시한 것이다. 이를 이용하여 연안으로부터 거리에 따른 클로로필-*a* 농도를 Fig. 6b에 나타냈다. 10년간 클로로필-*a* 농도의 거리에 따른 분포는 해안선으로부터 약 50 km 이내에는 약 60 mg/m^3까지 매우 높은 농도가 분포하였으며 외해로 갈수록 대부분 3-5 mg/m^3 이하의 농도가 분포했다. 일반적으로 연안의 클로로필-*a* 농도는 높게 나타나고 부분적으로 번성할 조건이 충족되지 않은 한

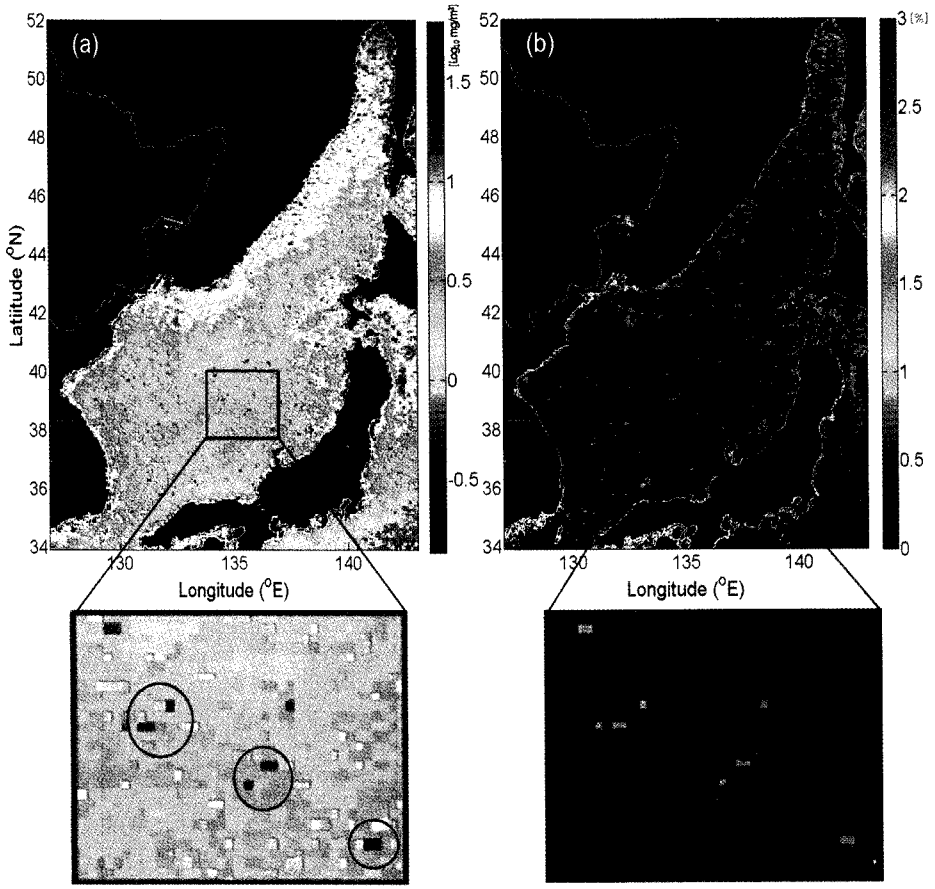

Fig. 5. (a) Maximum concentration of chlorophyll-*a* and (b) probability map of high chlorophyll-*a* concentration (>10 mg/m^3) at each pixel for a decade (September 1997-December 2007).

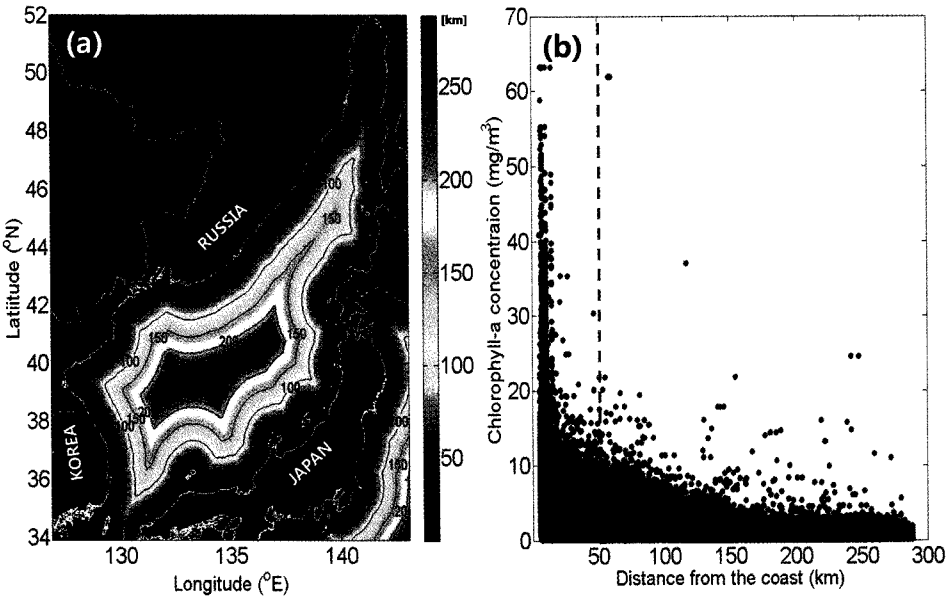

Fig. 6. Distribution of (a) distances from the nearest coast and (b) chlorophyll-*a* concentration as a function of a distance.

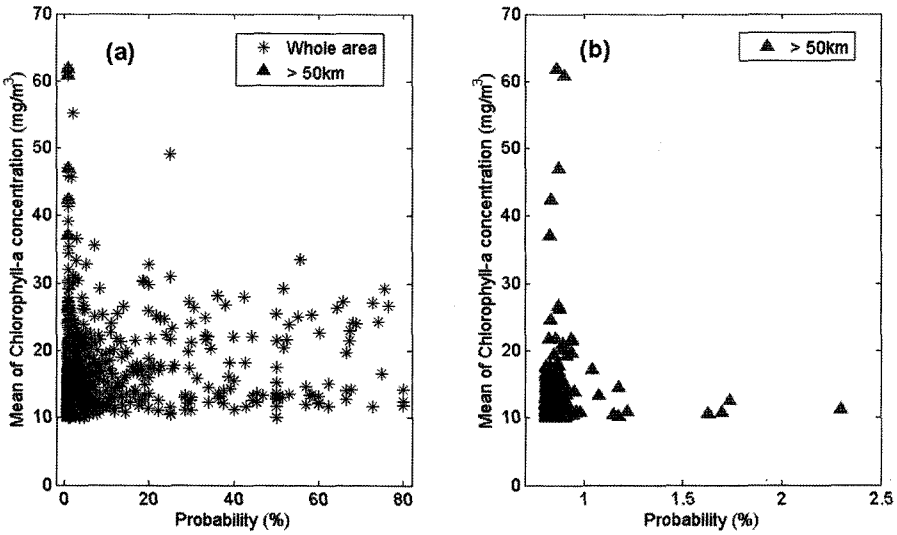

Fig. 7. Relationship between temporal mean and probability of anomalously high chlorophyll-*a* concentration at each pixel from (a) the whole study area and (b) the open sea in the East Sea (>50 km).

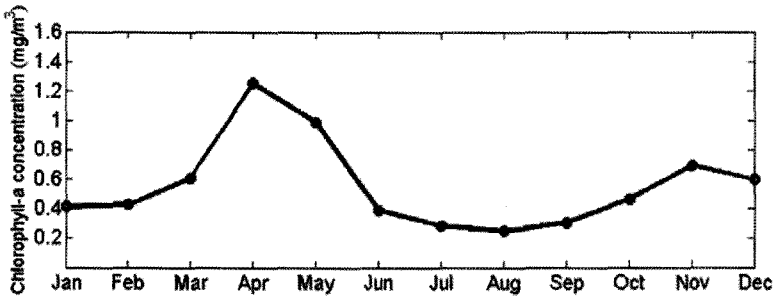

Fig. 8. Monthly mean of chlorophyll-*a* concentration for a decade (September 1997-December 2007).

외해로 갈수록 클로로필-*a* 농도가 점차 줄어든다. Fig. 6b에서도 같은 분포를 나타내고 있으나 붉은 선 바깥쪽의 연안과 거리가 먼 외해를 주목해 보면 정상적인 분포 외에 10-20 mg/m^3 이상의 일부 큰 값들이 산재되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 5b와 연관하여 각 화소마다 클로로필-*a* 농도가 10 mg/m^3 이상 되는 값들의 확률과 그 값들의 시간적인 평균과의 관계를 알아보았다(Fig. 7). 검은 점은 전체 연구 지역에 분포하는 값을 표현한 것이고, 회색 삼각형은 해안선으로부터 50 km 이상 떨어진 외해를 나타낸 것이다. Fig. 7b는 외해에서 나타나는 현상만 확대하여 나타냈다. 연안에서 10 mg/m^3 이상의 높은 농도가 나타날 확률은 평균값에 관계없이 0-80%까지 다양하게 분포했으나 외해의 확률은 1-2% 내외로 매우 작았다. 연안에서는 큰 변성이 빈번하게 일어나 높은 평균값을 결정하는 반면 외해에서는 스펙클로 나타나는 비정상적으로 큰 농도 값이 각 화소의 높은 평균값에 기여한다고 해석할 수 있다.

연안에서는 많은 영양염과 생태학적인 조건에 의해 클로로필-*a* 변성이 크게 일어나 클로로필-*a* 농도는 외해보다 훨씬 높다. 또한 육상 기원의 많은 부유물질과 육지와 바다의 경계로 인한 복잡한 대기 환경에 의해 실제 현상보다 클로로필-*a* 농도 값이 크게 나타날 수 있다(Gohin et al., 2002; Suh et al., 2002). 따라서 연안에서 나타나는 높은 클로로필-*a* 농도는 현장 관측 자료가 없이는 오차라고 단정 지을 수 없지만 Fig. 6b에서처럼 외해에서 드물게 나타나는 높은 농도는 비정상적인 오차 값이라고 사료된다.

스펙클 출현 시기

동해의 10년간 클로로필-*a* 농도의 월 평균값을 Fig. 8에 도시하였다. 본 연구에서는 연안을 제외한

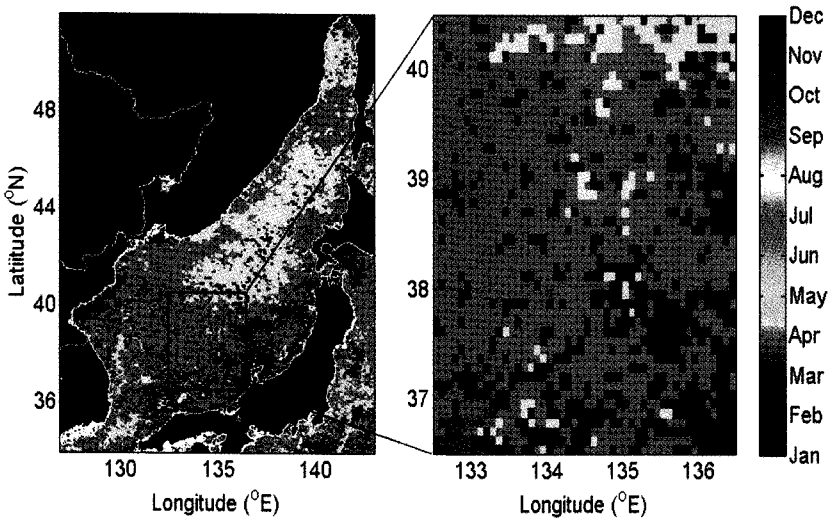

Fig. 9. Occurrence time of maximum chlorophyll-*a* concentration at each pixel for a decade (September 1997-December 2007).

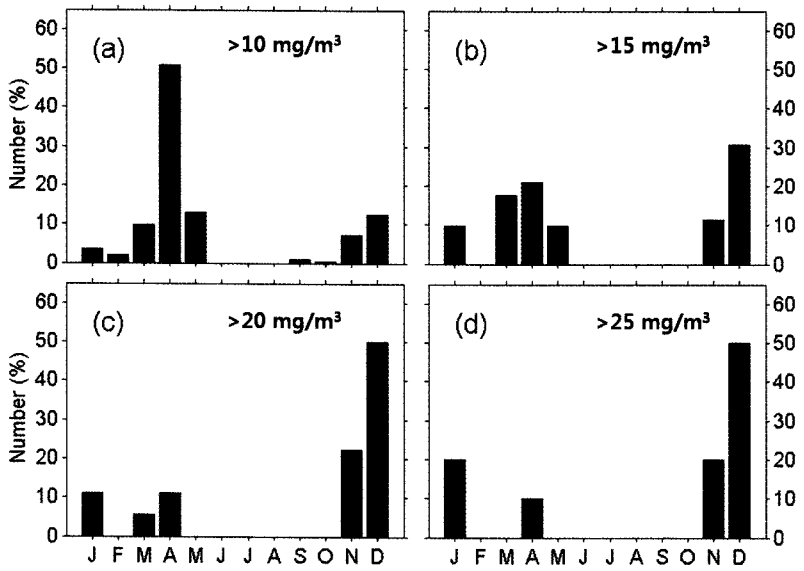

Fig. 10. Histograms of monthly maximum values for each pixel according to range of greater than (a) 10 mg/m^3, (b) 15 mg/m^3, (c) 20 mg/m^3, and (d) 25 mg/m^3.

외해에서 나타나는 특징과 오차를 분석하는 것이 목적이므로 해안선으로부터 50 km 이내의 화소들은 제외되었다. 클로로필-*a*는 3-5월까지 봄철에 한 번 크게 번성한다. 가을철 번성은 봄철 보다는 작게 번성하나 9월부터 증가하기 시작하여 11월까지 번성하다가 12월이 되면서 줄어든다. 연구 지역의 공간적인 번성 시기를 보기 위해 각 화소에서 최대 농도가 나타날 때의 시기를 Fig. 9에 도시하였다. 전반적인 바탕의 파란색은 대부분 최대 농도가 3-5월에 분포함을 의미한다. 봄철 번성이 동해 전체에 주를 이루고 가을 번성은 봄철 번성보다 대부분 값이 작기 때문에 그림에서 가을 번성은 잘 나타나지 않았지만 특징적으로 동해 남동쪽 넓은 지역에서 스펙클 형태로 11, 12, 1월에 최대 농도가 나타났다.

월별 최대 농도 값들의 도수분포표(Fig. 10)를 통해 각 월에 나타나는 최대 농도를 정량적으로 분석하였다. Fig. 10a는 최대 농도 중 10 mg/m^3 이상 되는 값을 모두 나타낸 것이다. 최대 농도 값들은 3월

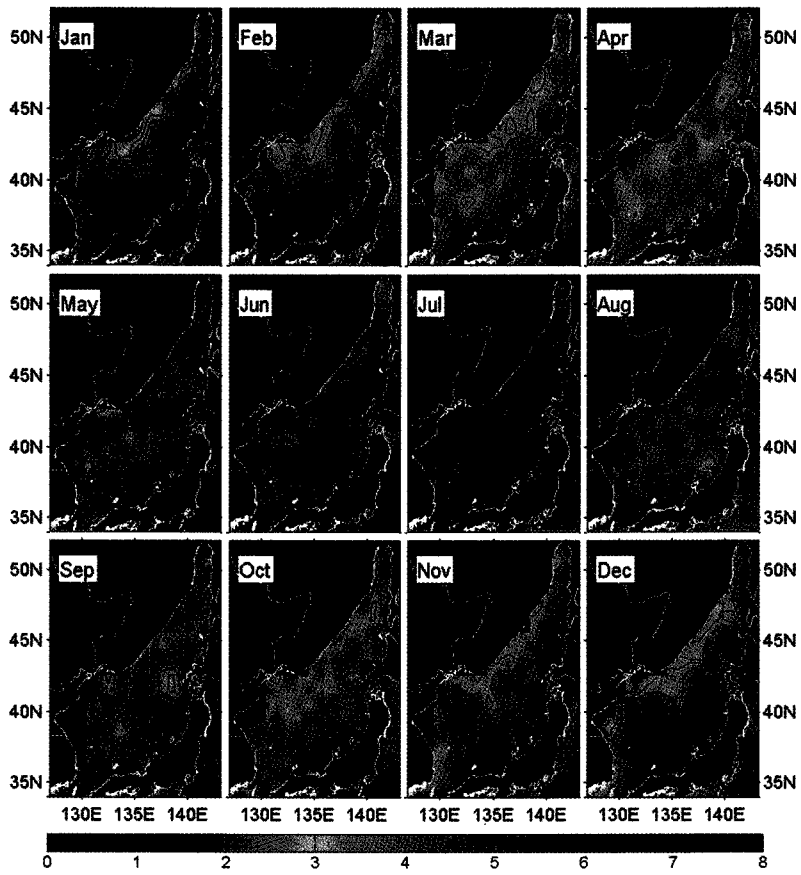

Fig. 11. Monthly mean of cloudiness from ICOADS for a decade (January 1998-May 2007).

에 가장 많이 분포하고 있어 클로로필-*a*의 봄철 번성이 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 15 mg/m^3 이상이 되는 최대 농도 값들을 분석한 결과 Fig. 10b에서 보여주는 것처럼 오히려 봄철의 비율은 줄어들고 겨울철 비율이 증가하였다. Fig. 10d의 25 mg/m^3 이상 값을 보면 이런 현상이 더 심해져서 11, 12, 1월이 차지하는 비율이 더 크게 증가하였다. Fig. 9와 비교하여 종합해보면 12월의 최대 농도는 주변과 연속적이지 않게 스펙클로 나타나며 봄철 최대 농도는 10 mg/m^3 이하의 값이 대부분을 차지하는데 반하여 12월에 나타나는 최대 농도는 30-60 mg/m^{3}까지 훨씬 큰 값을 가지고 있다. 이렇게 큰 값들은 겨울철 클로로필-*a* 농도 자료에서 스펙클로 나타났다. Fig. 3의 예시를 통해서도 알 수 있듯이 SeaWiFS 월별 Level-3 농도 자료에서 오차 값들은 스펙클 형태로 대부분 겨울철에 나타난다.

구름에 의한 영향

동해의 SeaWiFS 클로로필-*a* 농도 Level-3 월별 자료에서는 주로 겨울철에 스펙클이 많이 나타난다. 겨울철은 전반적으로 클로로필 농도가 낮은 시기인데 높은 클로로필-*a* 농도가 스펙클로 나타난다는 것은 실제적인 자연현상이 아니다. 이는 측정과정이나 처리과정의 오류라고 추론할 수 있다. 본 논문에서는 여러 원인 가운데 구름탐지과정의 실패에 초점을 두고 연구지역인 동해의 운량을 분석하였다. Fig. 11은 NOAA/ESRL의 ICOADS로부터 1998년 1월부터 2007년 5월까지의 약 10년간 운량의 월평균 자료를 나타낸 것이다. 그림에서 운량은 구름이 전혀 없을 때를 0, 전 하늘에 구름이 덮여있을 때를 8로 나타냈다. 대체적으로 6, 7월과 12, 1월에 운량이 크게 나타난다. 6, 7월에는 동해 전체에 6 이상의 구름이 넓고 균일하게 분포하는 반면, 12, 1월의 겨울철에는

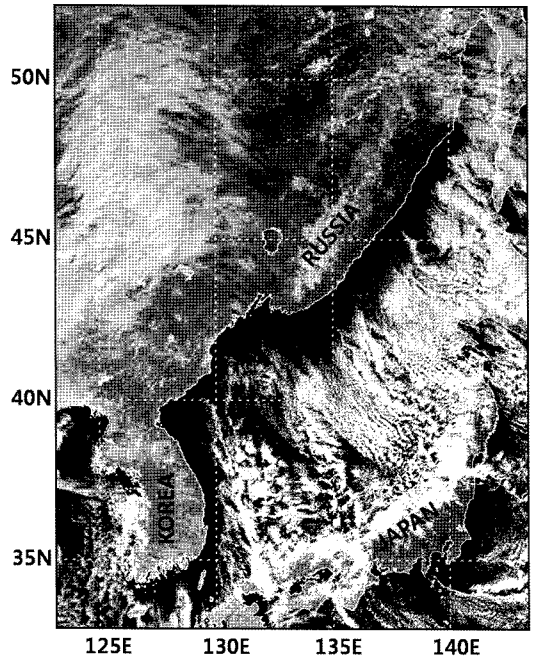

Fig. 12. Typical cloud distribution over the East Sea in winter from SNU/RIO.

연해주 연안 부근의 운량은 3 이하로 적은데 반하여 야마도 분지 부근을 중심으로 동해 남동쪽에는 운량이 6 이상으로 동해 북서쪽과 분리되어 나타난다. 운량 뿐 아니라 위성자료로 본 구름의 종류도 매우 다르게 나타난다. 여름에 동해 전체에 나타나는 구름은 주로 많은 강수를 동반하는 적운형 구름이고 간헐적으로 태풍이 지나가기도 하면서 운량이 커지게 된다. 주로 두꺼운 구름이어서 여름철 클로로필-*a* 농도의 일별 자료를 보면 자료의 양이 현저하게 적다.

겨울에 나타나는 구름의 형태는 여름철의 것과 매우 다르다. 겨울철 동해의 수온은 남북차이가 최대 15°C 정도로 매우 크다. 차갑고 강한 시베리아 바람은 러시아 연해주 남단의 블라디보스토크 부근의 해수면온도를 낮게 떨어뜨려 북서쪽의 해수면온도가 매우 낮은데 반하여 남동쪽 해수면온도는 대마난류의 유입으로 상대적으로 높아 큰 해수면온도 경사가 형성된다(Park et al., 2004). 이때 찬 북서풍이 동해를 지나면서 동해 남동쪽의 따뜻한 수온과 만나면서 구름을 형성하는데 이때 생기는 구름(Fig. 12)은 강한 바람방향에 따라 긴 구름이 열을 지어 분포하는 특징을 지니고 있으며 겨울철에 동해 남동쪽에서 자주 발생한다(Dorman et al., 2004). Kang and Ahn (2008)은 지형에 의해 유도된 역학적 요란과 강한 정적안정도가 구름 줄(cloud street)의 형성과 유지에 중요하며 따뜻한 수온으로부터의 강한 현열 공급과 구름 속에서의 잠열 방출이 외해에서 구름 줄을 오래 지속하는 주된 원인이라고 밝힌 바 있다. 또한 구름 줄에서 형성되는 구름은 작은 적운형태의 구름이 산재되어있는 특성을 보인다.

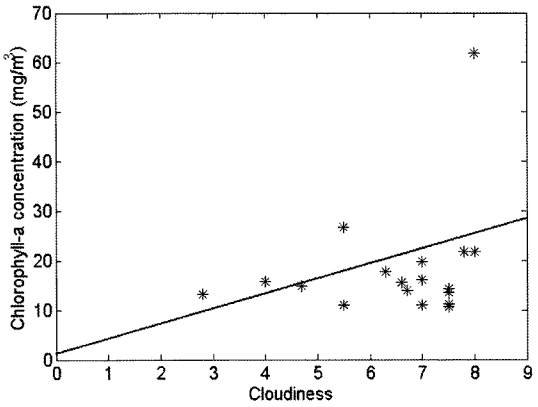

Fig. 13. Distribution of anomalous chlorophyll-*a* concentration as a function of cloudiness.

얇은 구름이나 산재되어 있는 구름, 특히 화소 크기보다 작은 구름의 경우 구름탐지가 잘 되지 않는다(Darzi, 1992). 구름탐지가 제대로 이루어지지 않으면 화소는 구름에 의해 오염되게 되고 결과적으로 비정상적인 관측 값으로 클로로필-*a* 농도를 산출하게 되므로 이때 오차를 유발할 수 있다고 판단된다.

겨울철 클로로필-*a* 농도자료에서 스펙클이 나타나는 화소를 찾고 스펙클이 나타날 때의 운량과의 관계를 분석한 결과 Fig. 13에서처럼 운량이 클수록 스펙클의 수가 증가하는 경향성이 있었다. 운량과 클로로필-*a* 농도의 단순 회귀 분석 결과 운량이 1단계 늘어남에 따라 스펙클로 나타나는 클로로필 농도가 3.06 mg/m^3 증가하는 통계적 특성을 보였다. 이는 겨울철 동해에 상주하는 특징적인 구름이 오차 유발 가능성을 크게 한다는 것을 의미한다. Fig. 9를 보면 연해주 부근의 북서쪽 해안에는 겨울철에 나타나는 스펙클 형태의 최대 농도 값이 나타나지 않는 것이 보인다. 이는 Fig. 11의 겨울철 운량 분포와 일치한다. 즉, 겨울철의 특징적인 구름이 형성되는 곳에 스펙클이 많이 발생함을 알 수 있다.

식 (2)에서처럼 클로로필-*a* 농도는 각 밴드간의 비율로 구해진다. 스펙클이 나타나는 지점과 그렇지 않은 인접한 화소의 각 밴드의 정규화된 수출 광량

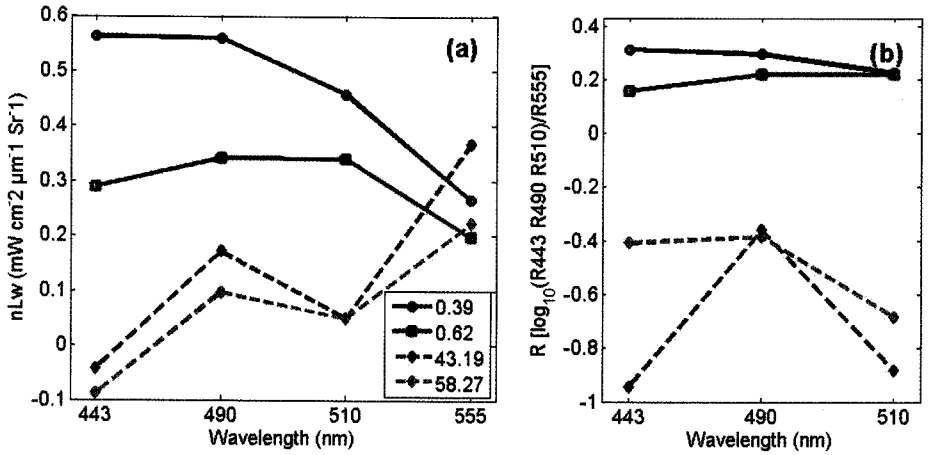

Fig. 14. Comparison of (a) normalized water-leaving radiance as a function of wavelength of each SeaWiFS band for the two cases of normal (blue, green) and abnormal (red, pink) and (b) spectral ratios of each band with respect to reflectance at 555nm. The numbers in the legend are chlorophyll-*a* concentration (mg/m^3).

(Normalized Water-leaving Radiance)을 비교해 보았다(Fig. 14). 정상적으로 낮은 클로로필-*a* 농도가 나타나는 화소와 달리 스펙클이 나타나는 곳은 443 nm 밴드에서 음의 값이 나타났고 490, 510 nm 밴드 모두 낮은 수치를 보였다. 반면 555 nm 밴드 수치는 정상적인 농도가 나타나는 화소와 같거나 오히려 높게 나타나기도 했다. 클로로필-*a* 농도식에 들어가는 값은 555 nm 밴드와의 비율로 구해지는데 이 과정에서 스펙클이 나타나는 지점의 값은 Fig. 14b와 같이 더 작아지게 된다. 이런 차이는 식 (2)에서처럼 클로로필-*a* 농도를 구하는 과정에서 증폭되어 비정상적으로 높은 농도의 스펙클로 나타나게 되는 것으로 판단된다.

토 의

일반적으로 적외선 인공위성 센서로부터 해수면온도를 산출하는 과정에서도 구름 제거에 의한 문제가 발생한다. 권운과 같은 얇은 구름을 제거하지 않은 채 해수면온도를 산출한 경우 실제보다 훨씬 낮은 온도로 산출된다. 이처럼 위성 자료에서 구름 제거의 과정은 자료에 대한 보정과 처리 이전에 매우 중요한 부분이다.

클로로필-*a* 농도 산출과정에도 이와 같은 문제가 발생한다. 본 연구에서 분석한 동해의 경우 특히 겨울철에 큰 오차를 보인다. 동해 겨울철에 발생하는 구름은 다른 계절과 달리 작고 산재되어 있는 구름 형태를 띠기 때문에 구름 탐지가 어렵다. 구름 제거에 실패한 화소의 경우 오염된 화소는 에어로졸 복사 값이 크게 측정되어 수출광량이 낮게 나타난다(Darzi, 1992). 따라서 대기 보정 전에 실시하는 옅은 구름이나 해수면 안개 탐지과정에서 실패한다면 이후 대기보정 과정에서 구름이 아닌 대기 에어로졸로 고려되어 대기보정 되므로(Darzi, 1992), 결과적으로 이러한 요인이 수출광량의 추정 값에 오차를 유발하게 하는 것으로 사료된다. 그 외의 가능한 요인으로는 겨울철 강한 바람이 해수면의 상태를 거칠게 만들고 'whitecap'이라는 현상이 발생하게 하므로, 이로 인한 잘못된 대기보정은 해수광신호의 왜곡을 초래할 수 있다(Wang, 2000). 이러한 수출광량의 오차는 클로로필-*a* 자료를 산출하는 과정에서 증폭되고 이때 발생하는 오차가 클로로필-*a* 자료에서 스펙클로 나타나는 것으로 판단된다.

본 연구에서 밝힌 스펙클에 대한 논의가 다른 해역에서도 보고된 바 있다(Arrigo and McClain, 1995; Hu et al., 2000a, 2000b; Patt et al., 2003). 구름 탐지 오류의 문제 뿐 아니라 에어로졸이나 해빙에 의한 관측오차, 디지털화 과정의 마무리 오차, 잡음 오차 등의 기계적인 처리과정에서의 원인과 스펙클을 줄이기 위한 다양한 방법들이 제시되었다(Arrigo and McClain, 1995; Hu et al., 2000a, 2000b). Arrigo and McClain(1995)는 이 오차를 줄이기 위하여 구름 탐지 알고리즘의 경계(flag) 값을 조정하기도 하였다. 이처럼 클로로필-*a* 자료 안에 스펙클을 줄이기 위한

노력에도 불구하고 SeaWiFS 자료 재처리를 위한 4차 알고리즘 평가과정에서도 여전히 스펙클 현상이 나타난다는 것이 밝혀졌다(Patt et al., 2003).

본 논문은 스펙클에 대한 다양한 원인 들 중에서 동해에서 스펙클이 겨울철에만 크게 나타나는 것에 초점을 두고 운량과 구름 특성의 영향만을 논의하였다. 클로로필-*a* 자료의 정확도 향상을 위해 구름, 바람, 해수면 거칠기, 해빙, 자료처리과정, 대기보정과정, 센서의 S/N(Signal/Noise)비 등 다양한 스펙클의 발생 원인들에 대한 심도 있는 연구가 이루어져야 할 것이다.

요약 및 결론

SeaWiFS 해색 센서의 클로로필-*a* 농도 Level-3 자료에서는 비정상적으로 큰 농도 값이 스펙클로 나타난다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 제기하고 스펙클 오차 특성을 분석하였다. 클로로필-*a* 농도는 주로 연안에서 크게 분포하는데 연안과 멀리 떨어진 외해에서도 비정상적으로 큰 값들이 산발적으로 분포했다. 외해에서 비정상적으로 큰 값들을 분석해 본 결과 주변 평균에 비해 편차가 10 mg/m^3 이상의 큰 차이를 보였으며 특히 이러한 현상은 시공간적으로 인접한 화소와 연계성이 전혀 없었다.

본 연구지역에서 비정상적으로 높은 농도의 스펙클은 주로 겨울철에 나타났다. 본 연구에서 스펙클 현상이 나타나는 것은 여러 원인들 중 겨울철 구름 분포와 주된 관련이 있었다. 10년간 월별 운량을 분석한 결과 겨울철 운량은 다른 계절과 달리 동해 남동쪽에 집중적으로 분포하였으며 이 지역에 스펙클이 집중되어 있었다. 겨울철 동해에서 운량이 클수록 스펙클 수가 많아지고 큰 농도의 스펙클이 나타나는 경향성을 보였다.

스펙클이 나타나는 곳의 각 밴드별 수출광량을 비교한 결과 짧은 파장 영역(443, 490, 510 nm)은 전체적으로 수출광량이 낮게 나타난 반면, 555 nm 밴드는 정상 화소와 유사한 분포를 보여 클로로필-*a* 농도 값을 비정상적으로 증폭시켰다.

해색 센서가 발전되고 자료 처리능력이 진보함에 따라 해색 자료가 가지는 오차가 많이 줄어들었지만 여전히 남아있는 클로로필-*a* 농도 자료의 스펙클에 관한 오차처리 없이 연구에 이용하게 된다면 부정확한 오차가 포함된 결과를 가져오게 할 수도 있을 것이다. 따라서 클로로필-*a* 농도 자료에 포함된 오차 값에 대해 정확한 이해가 선행되어야 하며 오차 특성을 고려하여 자료를 사용해야 해야 좀 더 정확도 높은 클로로필-*a* 농도 자료를 연구에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 정지궤도 해색위성(GOCI)활용연구 지원사업에 의하여 연구되었습니다. 구름 영상은 EAST-1 사업에 의하여 지원되었습니다. 세밀히 심사해주신 안유환 박사님과 양우헌 편집위원님, 그 외 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

Antoine, D., Campbell, J.W., Evans, R.H., Gregg, W.W., Lewis, M.R., Morel, A., Moulin, C., and Murakami, H., 2004, Guide to the Creation and Use of Ocean-Colour, Level-3, Binned Data Products. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group 4, 87 p.

Arrigo, K. and McClain, C., 1995, Cloud and ice detection at high Latitudes for Processing CZCS imagery. In Hooker, S.B., Firestone, E.R., and Acker, J.G. (eds.), NASA Technical Memorandum 104566, 28, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 8-12.

Banse, K. and English, D.C., 1994, Seasonality of coastal zone color scanner phytoplankton pigment in the offshore oceans. Journal of Oceanography, 99, 7323-7345.

Campbell, J.W., Blaisdell, J.M., and Darzi, M. 1995, Level-3 SeaWiFS data products: Spatial and temporal binning algorithms. In Hooker, S.B., Firestone, E.R., and Acker, J.G. (eds.), NASA Technical Memorandum 104566, 32, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 73 p.

Darzi, M., 1992, Cloud screening for polar orbiting visible and Infrared (IR) satellites. In Hooker, S.B. and Firestone, E.R. (eds.), NASA Technical Memorandum 104566, 7, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 7 p.

Dorman, C.E., Beardsley, R.C., Dashko, N.A., Friehe, C.A., Kheilf, D., Cho, K., Limeburner, R., and Varlamov, S.M., 2004, Winter marine atmospheric conditions over the Japan Sea. Journal of Geophysical Research, 109, C12011, doi:10.1029/2001JC001197.

Gohin, F., Druon, J.N., and Lampert, L., 2002, A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters.

International Journal of Remote Sensing, 23, 1639-1661.

Hu, C., Carder, K.L., and Muller-Karger, F.E., 2000a, Atmospheric correction of SeaWiFS imagery: Assessment of the use of alternative bands. Applied Optics, 39, 3573-3581.

Hu, C., Carder, K.L., and Muller-Karger, F.E., 2000b, How precise are SeaWiFS ocean color estimates? Implications of digitization-noise errors. Remote Sensing of Environment, 76, 239-249.

Kang, S.D. and Ahn, J.B., 2008, Numerical Study on the Formation and Maintenance Mechanisms of Cloud Street in the East Sea during Cold Air Outbreak. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 44, 105-119.

Liew, S.C., Chia, A.S., and Kwoh, L.K., 2001, Evaluating the validity of SeaWiFS chlorophyll algorithm for coastal waters. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, p. 5.

O'Reilly, J.E., Maritorena, S., Mitchell, B.G., Siegel, D.A., Carder, K.L., Garver, S.A., Kahru, M., and McClain, C., 1998, Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. Journal of Geophysical Research, 103, 24937-24953.

O'Reilly, J.E., Maritorena, S., Siegel, D.A., O'Brien, M.C., Toole, D., Mitchell, B.G., Kahru, M., Chavez, F.P., Strutton, P., Cota, G.F., Hooker, S.B., McClain, C.R., Carder, K.L., Müller-Karger, F., Harding, L., Magnuson, A., Phinney, D., Moore, G.F., Aiken, J., Arrigo, K.R., Letelier, R., and Culver, M., 2000, Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2 and OC4: Version 4. In Hooker, S.B. and Firestone, E.R. (eds.), NASA Technical Memorandum 2000-206892, 11, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 9-19.

Park, K.A., Chung, J.Y., and Kim, K., 2004, Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations. Geophysical Research Letters, 31, L07304, doi:10.1029/2004GL019424.

Patt, F.S., Barnes, R.A., Eplee, R.E.Jr., Franz, B.A., Robinson, W.D., Feldman, G.C., Bailey, S.W., Gales, J., Werdell, P.J., Wang, M., Frouin, R., Stumpf, R.P., Arnone, R.A., Gould, R.W.Jr., Martinolich, P.M., Ransibrahmanakul, V., O'Reilly, J.E., and Yoder, J.A., 2003, Algorithm updates for the fourth SeaWiFS data reprocessing. In Hooker, S.B. and Firestone, E.R. (eds.), NASA Technical Memorandum 2003-206892, 22, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 1-67.

Sancak, S., Besiktepe, S.T., Yilmaz, A., Lee, M., and Frouin, R., 2005, Evaluation of SeaWiFS chlorophyll-*a* in the Black and Mediterranean Seas. International Journal of Remote Sensing, 26, 2045-2060.

Suh, Y.S., Jang, L.H., Mitchell, B.G., Kahru, M., Prasad, K., and Shin, H.Y., 2002, Study on the Korean Waters using the CAL/VAL of the OSMI Level 2 Data. Korean Journal of Remote Sensing, 18, 127-139.

Wang, M., 2000, The SeaWiFS Atmospheric Correction Algorithm Updates. In Hooker, S.B. and Firestone, E.R. (eds.), NASA Technical Memorandum 2000-206892, 9, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 58-64.

2009년 1월 15일 접수
2009년 2월 19일 수정원고 접수
2009년 3월 23일 채택