

원격 수질 측정을 위한 현장 초분광 복사계 및 수중 구성성분 관측 자료 분석

Analysis of Hyperspectral Radiometer and Water Constituents Data for Remote Estimation of Water Quality

김원국¹⁾ · 최준명²⁾
Kim, Wonkook · Choi, Jun Myoung

Abstract

Remote estimation of water quality via radiometric instruments provides a convenient means for monitoring environmental changes in water bodies in wide areas. Combined with platforms such as satellite, manned/unmanned vehicles, it reduces the measurement cost and time for acquiring water quality information on the interested target areas. To develop accurate retrieval algorithms, however, acquisition of in-situ measurements from various optical environment is critical. In this study, hyperspectral radiometric measurements, the coincident water quality variables, and its optical properties were obtained to analyze the optical environment of the study area. Field data collected around the Tongyeong area showed that the area has optically complex environment, with occasional outbreak of red tide in summer seasons. Effect of water constituents on the optical variables (remote sensing reflectance and absorption coefficients) were qualitatively analyzed.

Keywords : Water Quality, Remote Sensing, Hyperspectral, Chlorophyll-a, Total Suspended Matter, Absorption

초 록

복사계 장비를 이용하여 수질을 원격으로 추정하는 기술은 광역 수권환경의 변화를 모니터링함에 있어서 효과적인 수단을 제공한다. 위성 또는 유무인 항공기 등의 플랫폼과 결합되어 사용될 시, 광역 수질정보 획득에 소요되는 비용 및 시간을 절감할 수 있다. 정확한 원격 추정 알고리즘을 개발하기 위해서는 다양한 광학적 환경에서 획득된 현장 관측 자료의 확보가 매우 중요하다. 본 연구에서는 조사지역의 광학적 환경을 분석하기 위하여, 초분광 복사량 및 수중 구성물질에, 그리고 그 구성물질의 광학적 특성에 대한 자료가 획득되었다. 조사해역으로 설정된 통영 인근 해역에 대한 관측자료를 분석한 결과, 조사해역은 광학적으로 복잡한 해역임이 나타났고, 일부 정점에서 적조생물을 포함한 수괴가 발견되었다. 또한, 각 수중 구성성분이 원격탐사 반사도 및 흡광계수에 미치는 영향에 대한 정성적인 분석결과를 제공한다.

핵심어 : 수질, 원격탐사, 초분광, 엽록소, 총부유물, 흡광

Received 2018. 08. 03, Revised 2018. 08. 07, Accepted 2018. 08. 10

1) Corresponding Author, Member, Korea Ocean Satellite Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology (E-mail: wkkim@kiost.ac.kr)

2) Korea Ocean Satellite Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology (E-mail: jchoi@kiost.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

원격으로 수질을 측정하는 연구는 주로 미국 및 유럽 학계를 중심으로 광학위성을 활용하는 연구를 중심으로 발전해왔다. 원격 수질 측정은 분광학적으로는 주로 400nm 부터 700nm 까지를 포함하는 가시광선 대역에서 물속의 구성 물질이 일으키는 광학적 상호작용을 분석함으로써 이루어진다. 물리적 화학적 성질이 거의 같은 해수의 모임, 즉 수괴(水塊)로부터 나오는 복사량인 수출광량 또는 수출복사휘도(water-leaving radiance)를 분석하면 수중 구성성분의 농도 및 분포를 파악할 수 있는데, 이러한 원격 복사량관측 기술은 위성, 항공기, 그리고 최근에는 드론에 이르기 까지 적용되어, 빠른 시간 안에 넓은 공간에 대한 수질 분포를 파악할 수 있다는 장점이 있다.

원격 수질 관측은 여러 가지 환경 관측 사례에 활용되었는데, 예를 들면 수괴 표층의 엽록소 농도 추정, 일차 생산성 추정, 부유물의 분포 및 이동, 유해 조류의 발생 및 탐지 등이 응용사례이다. 특히, 우리나라 연안에서 자주 발생하는 적조는 1995년, 2013년에 각각 950억원, 220억원에 이르는 막대한 수산 피해를 발생한 바 있고(Park *et al.*, 2013), 이를 위해 국립수산과학원에서는 해마다 적조 발생 시기에 선박을 이용한 예찰 활동을 펼쳐 적조 피해를 예방하고 있다. 하지만, 이러한 선박을 이용한 예찰은 비용 및 시간상의 문제로 주로 육지에서 가까운 해역에만 국한되고 있어, 넓은 해역 또는 원해에 발생하는 적조를 탐지하기 어렵다는 측면이 있어 위성 및 무인기를 이용한 원격탐사에 대한 수요가 증대하고 있다(Kim, 2014; Shang *et al.*, 2017; Son, 2018).

수괴로부터의 복사량을 이용하여 수중 구성물질을 추정하기 위해서는 엄밀한 자료처리 기법의 적용이 필요하다. 우선, 수괴를 향하여 관측한 광량(수괴복사휘도)에서 수표면에서 반사된 광량을 제하여서 순수하게 수괴 내부에서 발생한 광량, 즉 수출광량을 구해야만 수중 구성물질에 대한 정보를 얻을 수 있다(Lee *et al.*, 1999). 이를 위해서 수괴를 향하여 관측한 광량 외에 대기를 향하여 관측한 대기 광량을 관측해야하며, 이 대기 광량에 표면 반사 효율(Fresnel reflectance factor)을 곱하여 표면 반사 광량을 구해야 한다(Lee *et al.*, 2010). 하지만, 수출광량은 그 때 그 때의 대기의 조명 조건과 태양 고도에 따라 달라지기 때문에, 일관된 수질 추정 기법을 도출하기 위해서 이 수출광량을 대기 하향복사조도(downward irradiance)로 나눈 원격탐사 반사도(remote sensing reflectance)를 주로 사용하게 된다.

엽록소 농도 추정에는 주로 가시광선 대역 및 근적외선 대역

을 이용하여 이루어진다. 엽록소는 주로 청색 대역(400nm - 500nm)에서 강한 흡광을 일으켜서 엽록소 농도가 높은 수괴는 주변 수괴에 비해 청색 원격탐사 반사도가 낮게 나타난다. 또한, 660nm 부근의 엽록소 흡광 및 입자 산란, 그리고 700nm 이상에서의 물의 강한 흡광은 680-700nm 부근에서 원격탐사 반사도에 강한 피크를 나타내는데, 이를 이용하여 엽록소 농도를 추정하기도 한다(Gower *et al.*, 1999; Gower *et al.*, 2004).

하지만, 많은 엽록소 농도 원격 추정 시도들에도 불구하고 수중 구성성분이 복잡한 수괴의 경우 개별 구성성분을 정확히 추정하는데 많은 어려움이 있다(Le *et al.*, 2013). 특히, 부유물의 농도가 높은 연안의 경우, 엽록소의 청색 흡광 및 700nm 부근의 피크가 비교적 잘 드러나지 않거나 비선형적인 관계를 가지게 되어 원격탐사 반사도에서 엽록소 농도를 정확히 추정하기가 어렵다는 보고가 많다. 하지만, 수질에 대한 관심과 필요가 높은 곳은 주로 하천이나 연안 등 사람이 활동이 활발한 곳으로 엽록소 외의 구성성분이 많은 수괴인 경우가 많아, 광학적으로 복잡한 수괴에 대한 정밀 추정 기법에 대한 연구 필요가 높다고 할 수 있다(Kim *et al.*, 2016).

본 연구에서는 우리나라 통영 인근 해역에서 관측한 원격탐사 반사도 및 엽록소, 부유물, 용존유기물의 흡광 특성을 분석하고, 해수에서 직접 관측한 엽록소 농도, 부유물 농도의 분포를 통해 통영해역에서의 전반적인 광학적인 환경을 분석한다. 본 조사는 선박을 이용하여 총 25km x 25km 에 이르는 통영인근해역(Fig. 1)을 조사하였고, 해수 채수를 통해 구성성분 및 광학 특성을 분석하였다. 수질관측을 위하여 초분광 분광복사계인 TriOS RAMSES를 이용하여 해수복사휘도(water radiance), 대기복사휘도(sky radiance), 하향복사조도의 3가지 관측을 수행하였고 전처리를 통하여 원격탐사 반사도를 계산하였다. 또한, 일부 해역에서 적조가 발생하여 적조 수괴에 대한 광학 관측 값을 취득하였고, 일반 비적조 수괴의 광학특성과의 차이를 분석하였다.

2. 실험지역 및 현장조사

2.1 실험지역

현장조사는 2017년 8월 11일 하루 동안 이루어졌다. 현장조사 목적은 (1) 통영 인근해역에서의 생지화학(bio-geochemical) 특성 및 전반적인 분포를 파악하고 (2) 8월 7일에 이미 그 발생이 발표된 적조 수괴를 찾아 그 광학적 특성에 대한 자료를 획득 분석하는 것이었다(Fig. 1). 광학적인

로 관측이 가능한 생지화학적 변수로는 엽록소 농도(생물), 부유물의 농도(지질), 용존유기물의 흡광(화학)이 있다. 통영 해역은 적조 발생으로 인한 양식장 피해가 빈번하게 발생하였던 지역으로, 연안 해역에 많은 가두리 양식장이 분포하고 있고 적조가 발생하는 해에는 매년 적조의 유입이 관찰되었던 해역이다(Lee, 2006). 모든 정점(황색 및 적색 정점)에서 CTD (Conductivity, Temperature, and Depth) 센서를 통하여 표층의 수온, 염분이 측정되었고, 표층으로부터 채수한 물의 필터지 여과를 통하여 엽록소-a 농도가 측정되었다(Fig. 1). 적색 정점에서는 수온, 염분, 엽록소-a 농도 외에도 광학관측이 추가로 수행되었다. 채수된 물로부터 부유물 농도, 엽록소 흡광, 용존유기물 흡광, 부유입자 흡광, 그리고 해수 밖에서 원격탐사 반사도가 측정되었다. 적색 별로 표시된 정점은 적조 해수를 관측한 위치를 나타낸 것으로, 다른 적색 정점과 마찬가지로 기본 인자(수온, 염분, 엽록소-a)와 광학 인자(부유물 농도, 흡광, 원격탐사 반사도)가 모두 측정되었다. 하루 내에 해당해역을 모두 조사해야하는 시간적 제약으로 인하여, 정점당 10분 정도의 시간이 소요되는 광학 관측은 모든 정점에서 수행되지 않고 4개의 측선을 중심으로 일부 정점에서만 수행되었다(적색원 정점). 본 연구에서 일컫는 광학 관측은 원격수질 관측 연구를 위해 필요한 광특성과 관련된 관측항목을 뜻하는 것으로, 다음 항목을 포함한다; (1) 엽록소, 부유물, 용존유기물의 흡광 특성, (2) 엽록소 및 부유물의 농도, (3) 초분광 센서를 이용한 원격탐사 반사도. D0, H0 정점에서 적조 수괴를 발견하였으며(Fig. 2), 표층 해류를 따라 움직이는 적조 수괴를 따라 수회 반복하여 광학 관측을 수행하였다.

2.2 해수구성성분의 농도 측정 및 광학 특성 측정

모든 관측 방법 및 프로토콜은 Moon *et al.* (2012)를 따라 수행되었다. 해수 중의 엽록소 농도는 식물성 플랑크톤이 함유하고 있는 클로로필-a의 농도를 의미하는 것으로 단위 체적당 엽록소의 무게로 나타내어진다. 엽록소 농도의 측정은 47mm GF/F (Glass microfiber) filter를 이용하여 해수를 여과한 후 90% 아세톤으로 색소를 추출하고 초분광 분광광도계(spectro-photometer) Perkin-Elmer Lambda-19를 사용하여 이루어졌다(Jeffrey and Humphrey, 1975). 총부유물(TSM: Total Suspended Matter)는 해수 중에 존재하는 유무기의 부유물을 뜻하는 것으로 퇴적물 등의 무기 부유물과 생물입자 등과 같은 유기 부유물을 모두 포함하며 역시 단위 체적당 부유물의 건중량으로 그 농도를 측정한다. 총부유물 농도는 사전에 중량이 측정된 47mm polycarbonate membrane

filter를 사용하여 해수를 채수한 뒤, 냉동보관하여 실험실로 운반되어 측정된다. 실험실에서 60°C 오븐에 4시간 건조 후 정밀저울을 이용하여 무게를 측정하며, 사전에 측정된 무게와의 차이를 여과된 해수의 양으로 나누어 부유물의 단위 체적당 중량을 결정한다.

흡광계수(absorption coefficient)는 단위거리 당 흡수되어 소멸한 광량의 정도를 나타내는 변수로, 엽록소 및 무기 부유물 흡광은 filter-pad 방법(Kishino *et al.*, 1985)을 통해 측정한다. 우선 각 정점에서의 해수를 25mm Whatmann GF/F filter를 이용하여 여과한 후 분광광도계(Cary-100 UV/VIS spectrophotometer)를 이용하여 총 부유물질에 대한 흡광을 측정하고, 이 후 메탄올 용액으로 색소를 제거한 후 남아있는 무기입자에 대한 흡광을 측정한다. 용존 유기물흡광은 25mm membrane syringe filter를 이용하여 측정하였다.

해수 원격탐사 반사도는 해수로부터 나오는 복사휘도, 즉 수출광량을 하향복사조도로 나누어 정규화하여 나타낸 값으로서, 본 연구에서는 원격탐사 반사도 측정을 위하여 TriOS사의 RAMSES 초분광 분광복사계가 사용되었다. RAMSES는 복사휘도 측정을 위한 2개의 RAMSES-ARC 센서와 복사조도(irradiance) 측정을 위한 1개의 RAMSES-ACC 센서로 구성되어있으며 각각 7°의 FOV (Field-Of-View)를 가지고 280nm - 950nm 구간의 광량을 측정할 수 있다. 해수반사도 추정을 위해서 해수복사휘도, 대기복사휘도, 그리고 하향복사조도의 측정이 필요하고, 해수복사휘도는 아랫방향으로 천정각 40°, 대기복사휘도는 윗방향으로 천정각 40°를 유지하여 관측하였고, 두 복사량 모두 태양과의 상대 방위각 135°를 이루어 관측하였다. 자세한 관측 프로토콜 및 자료 전처리하는 Moon *et al.* (2012)에 기술되어 있다.

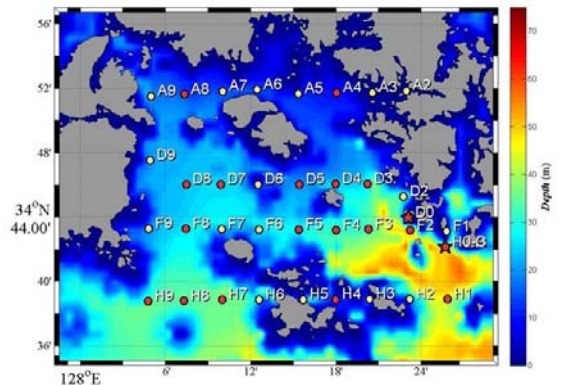


Fig. 1. The station map in the study area around Tongyeong.



Fig. 2. RGB photo of sea waters with red tide patch (Station D0)

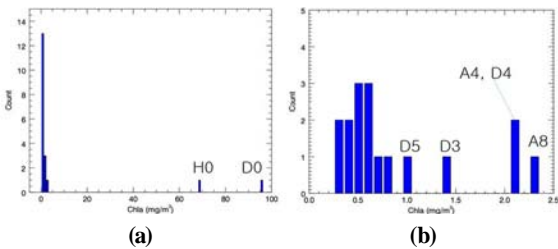


Fig. 3. Histogram for chlorophyll-a concentration; (a) for all the stations, and (b) for the stations with chlorophyll-a concentration less than 2.5mg/m^3

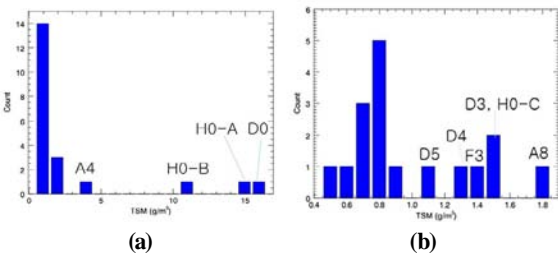


Fig. 4. Histogram for total suspended matter concentration; (a) for all the stations, and (b) for the stations with chlorophyll-a concentration less than 2.0mg/m^3

3. 결과

3.1 엽록소 및 부유물 농도

조사해역에서의 엽록소 농도는 적조 수괴를 제외하고, 대략 $0.2\text{mg/m}^3 - 2.5\text{mg/m}^3$ 사이에 형성되었다. 그 중에서 비교적 높은 엽록소 농도($>1.0\text{mg/m}^3$) 육지에서 가깝고 수심이 얇은 정점(A4, A8, D3, and D4)에서 관측이 되었고, 대부분은 1.0mg/m^3

이하의 농도를 나타내었다. 적조 수괴에서는 적조의 밀집특성에 따라 60mg/m^3 이상의 엽록소 농도를 나타내었고 고농도 정점인 D0에서는 96mg/m^3 에 이르렀다(Fig. 3).

부유물 농도는 비적조 수괴에서 0.4 to 5g/m^3 의 범위를 보였고, 대부분의 정점에서 2g/m^3 이하로 나타났다. 적조 정점(H0, D0)에서는 적조생물입자의 영향으로 10g/m^3 를 넘는 높은 부유물 농도를 보였다(Fig. 4). 비적조 해수에서의 부유물 농도 범위($0.4\text{g/m}^3 - 2\text{g/m}^3$)는 일반적인 밴드비(band ratio) 기반의 알고리즘에 상당한 오류를 발생시킬 수 있는 정도의 농도로서 (Kim, et al., 2016), OC3 (Ocean Color algorithm with 3 bands) (O'Reilly et al., 1998)나 FLH (Fluorescence Line Height)(Gower et al., 2004) 등의 경험적 기법을 사용할 시 과대추정을 일으킬 수 있는 정도의 부유물 농도이다. 부유물 농도가 0.5g/m^3 를 초과하는 해수의 경우 OC3 알고리즘을 통한 엽록소 농도 추정이 낮은 엽록소 농도 구간($<2\text{mg/m}^3$)에서 50% - 200% 가량의 과대추정을 나타낼 수 있고, 엽록소 농도가 2mg/m^3 를 초과하는 구간에서는 과소추정을 나타낼 수 있음을 볼 때, 본 해역의 부유물 범위($0.4\text{g/m}^3 - 2\text{g/m}^3$)는 이러한 오차에 대한 보정이 필요한 해역이라고 할 수 있다.

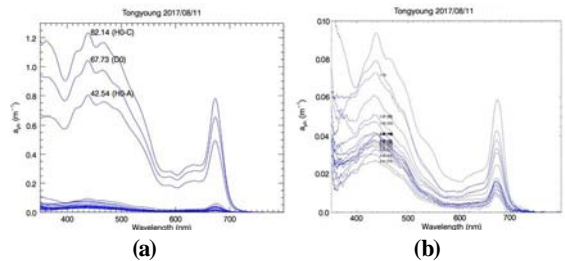


Fig. 5. Absorption spectrum for chlorophyll-a in the surface waters; (a) for all the stations, and (b) for the stations with no red tide

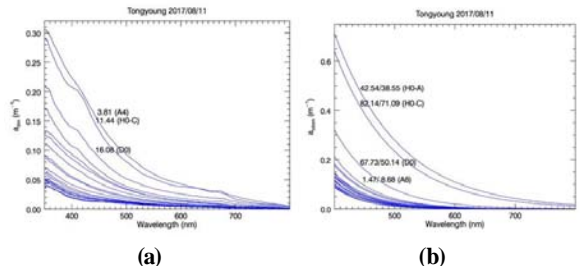


Fig. 6. Absorption spectrum of surface waters for (a) detritus and mineral particles, and (b) colored dissolved organic matter

3.2 흡광계수

비적조 수괴의 흡광은 443nm 와 675nm 에서 높은 수치를 보

였고(Fig. 5(b)), 엽록소의 농도가 높아짐에 따라 높은 흡광을 나타내었다. 특히, 적조 수괴에 대해서는 월등히 높은 흡광을 나타내었으며, 비적조 해수와는 다르게 UV (Ultra-Violet) 대역 (< 400nm)에서도 강한 흡광을 나타내었다(Fig. 5(a)).

총부유물에 의한 흡광은 단파장으로 갈수록 순증하는 형태를 보이고, 전체적인 흡광계수가 부유물 농도가 높을수록 높아지는 양상을 보였다(Fig. 6(b)). 부유물에 의한 흡광은 유기물을 아세톤으로 용해시킨 후 남은 성분에 대한 흡광을 측정하기 때문에, 적조 수괴가 높은 부유물 농도를 나타내는 반면에 흡광계수는 기타 비적조 해수보다는 높지만 TSM 차이만큼 높은 수치를 보이지는 않는다. 예를 들어 가장 높은 부유물 흡광은 정점 A4에서 나타났는데 그 때의 부유물 농도는 3.81g/m³에 불과한 반면 그와 비슷한 크기의 흡광을 나타내는 H0-C 정점의 경우 부유물 농도가 11.44g/m³로 월등히 높은 것을 볼 수 있다.

용존유기물에 의한 흡광은 적조 수괴에서 확실히 높은 값을 가지는 것으로 나타났다(Fig. 6(b)). 적조 정점인 H0-A, H0-C, D0의 세 정점에서 가장 높은 용존유기물 흡광이 나타났고,

엽록소 농도 및 광색소(pheopigment)의 농도도 이 세 정점에서 가장 높게 나타났다. 엽록소 농도는 H0-A, H0-C, D0에서 40mg/m³ 이상으로 나타나 적조 생물로부터의 유기물이 높은 흡광에 기여하였음을 시사하고 있다.

부유물에 의한 흡광은 단파장으로 갈수록 순증하는 형태를 보이고, 전체적인 흡광계수가 부유물 농도가 높을수록 높아지는 양상을 보인다. 부유물에 의한 흡광은 유기물을 아세톤으로 용해시킨 후 남은 성분에 대한 흡광을 측정하기 때문에, 적조 수괴가 높은 TSM을 나타내는 반면에 흡광계수는 기타 비적조 해수보다는 높지만 TSM 차이만큼 높은 수치를 보이지는 않는다. 예를 들어 가장 높은 부유물 흡광은 정점 A4에서 나타났는데 그 때의 부유물 농도는 3.81g/m³에 불과한 반면 그와 비슷한 크기의 흡광을 나타내는 H0-C 정점의 경우 부유물 농도가 11.44g/m³로 월등히 높은 것을 볼 수 있다.

3.3 초분광 원격탐사 반사도

RAMSES를 이용하여 관측한 원격탐사 반사도는 Fig. 7에 해수의 특성별로 분류하여 도시하였다. 조사해역에서 관측한 반사도 자료는 크게 부유물 농도가 높지 않고 통상적인 수준의 엽록소 농도(< 1mg/m³)를 가지는 일반 해수(Fig. 7(a) and (b))와 부유물 농도가 1g/m³ 이상인 탁한 해수(Fig. 7(c) and (d)) 그리고 적조 생물을 포함한 해수(Fig. 7(e) and (f))의 세가지 분류로 나누었다. 일반해수는 엽록소 흡광의 영향으로 490nm 이하의 파장대에서 반사도가 낮아진 것을 관측할 수 있었고 675nm 근방에서 형광으로 인한 피크를 관측할 수 있었다. 엽록소 흡광으로 인하여 한 스펙트럼(spectrum) 내에서 가장 높은 반사도는 대략 490nm 부근에서 나타났고 그 값은 최대 0.005 sr⁻¹ 정도에 이르렀다. 부유물 농도가 상대적으로 높은 탁한 해수의 경우 555nm 부근을 중심으로 강한 반사도 증가 효과로 인하여 일반해수와는 다른 스펙트럼 형태를 나타내었고 크기 또한 555nm 부근에서 0.01 sr⁻¹ 이상으로까지 올라가는 것을 볼 수 있다. 부유물이 높은 정점(A4, D4, A8, D3)은 엽록소 또한 일반해수보다는 높아서(> 1mg/m³) 전반적으로 높은 반사도에도 불구하고 675nm 부근의 형광피크가 비교적 잘 관측이 되고 있다.

적조해수의 경우 가장 특징적으로 청색 대역의 반사도가 440nm 부근을 중심으로 급격히 낮아진 것을 볼 수 있고 짙은 적조의 경우 흡광의 영향이 500nm - 550nm 에도 영향을 주어 560nm 부근에서 반사도 피크가 형성되는 것을 볼 수 있다. 더욱 특징적인 점은 700nm 부근의 반사도 피크의 크기가 일반 해수에 비하여 4 배에 이르는 것을 볼 수 있고, 고농도의 경우 560nm 부근의 피크와 유사할 정도로 강하게 형성되는 것을 볼 수 있다. 근적외선 대역(> 800nm) 반사도의 경우, 일반해수보다

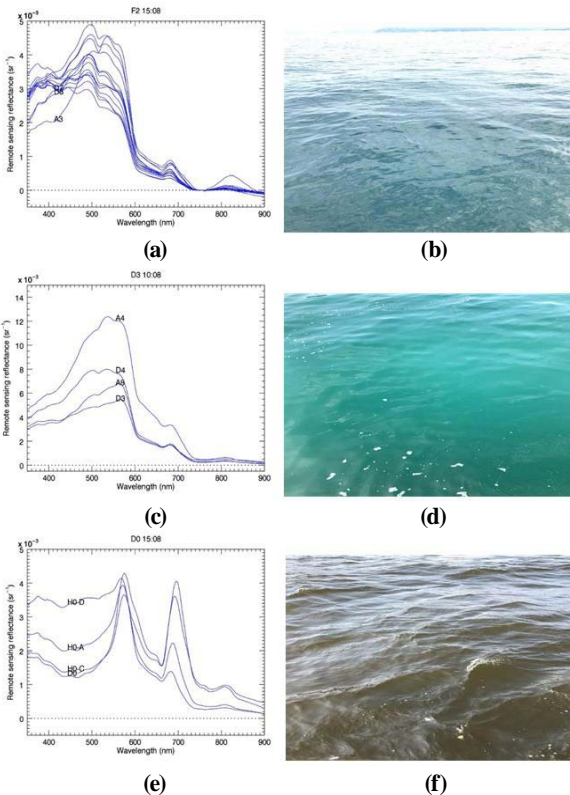


Fig. 7. Hyperspectral remote sensing reflectance and RGB images for the sea waters categorized into the three classes; (a)(b) normal sea water, (c)(d) turbid water, and (e)(f) red tide water

는 큰 산란이 있는 것을 볼 수 있고, 이는 적조 생물 입자의 산란 때문으로 추정된다.

4. 결론

본 연구는 연안 해역의 해수를 대상으로 초분광 반사도 및 흡광 특성을 측정함으로써 원격 수질 관측에 필요한 변수들을 분석하고 통영해역 전반에 대한 광학적 특성을 분석하였다. 통영 해역은 그 구성 물질의 분포를 보았을 때 광학적으로 복합적인 특성을 지니고 있고, 염록소 농도 및 부유물의 변화가 일반 밴드비나 경험적 알고리즘으로는 추정이 되지 않는 범위를 가지고 있음을 확인하였다. TriOS RAMSES를 이용하여 관측한 원격탐사 반사도는 구성성분에 따른 변화를 명확히 나타내었고, 수질 특성에 따라 구별되는 반사도가 얻어짐을 확인하였다. 특히 적조생물이 분포한 수괴에서 흡광 및 반사도 특성이 관측되었고, 일반 해수 즉 규조류를 중심으로 한 평상시의 비적조 해수와의 차이가 나타남을 확인하였다.

앞으로의 연구는 이러한 원격탐사 반사도를 이용하여 구성 성분의 농도를 추정하기 위하여 반분석적 추정 기법이나 복사 전달모델을 이용한 기법을 적용하여 현장 관측값과의 비교 검증을 수행해야 할 필요가 있다. 또한 통영 해역에 맞는 플랑크톤 및 부유물의 광학 특성에 따라 반분석적인 방법 또한 지역적인 적응(adaptation)이 필요한 지에 대한 연구가 수행되어야 한다. 적조 생물에 대한 분석자료를 토대로 저농도에서부터 적조를 탐지할 수 있는 연구 또한 중요하고 앞으로 수행되어야 할 연구이다.

감사의 글

이 논문은 해양수산부의 연구개발 사업인 “적조피해 최소화를 위한 적조 탐지-예측시스템 구축 및 실증화” 및 “해양탐재체 통합자료처리시스템 개발”의 지원을 받아 수행된 연구임

References

Gower, J.F.R., Brown, L., and Borstad, G.A. (2004), Observation of chlorophyll fluorescence in west coast waters of Canada using the MODIS satellite sensor, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 1, pp. 17-25.

Gower, J.F.R., Doerffer, R., and Borstad, G.A. (1999), Interpretation of the 685nm peak in water-leaving radiance

spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, No. 9, pp. 1771-1786.

Jeffrey, S.W. and Humphrey, G.F. (1975), New spectrophotometric equation for determining chlorophyll a, b, c1 and c2, *Biochemie und physiologie der pflanzen*, Vol. 167, No. 2, pp. 191-194.

Kim, H. (2014), *Utilization Plan of Drones for the Field of Ocean and Fishery*, Issue Analysis Report No. 2014-06, Korea Maritime Institute (KMI), Busan, pp. 5-36.

Kim, W., Moon, J.E., Park, Y.J., and Ishizaka, J. (2016), Evaluation of chlorophyll retrievals from Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) for the North-East Asian region, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 184, pp. 482-495.

Kishino, M., Takahashi, M., Okami, N., and Ichimura, S. (1985), Estimation of the spectral absorption-coefficients of phytoplankton in the sea, *Bulletin of Marine Science*, Vol. 37, No. 2, pp. 634-642.

Le, C.F., Hu, C.M., Cannizzaro, J., English, D., Muller-Karger, F., and Lee, Z. (2013), Evaluation of chlorophyll-a remote sensing algorithms for an optically complex estuary, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 129, pp. 75-89.

Lee, Y.S. (2006), Factors affecting outbreaks of high-density *Cochlodinium polykrikoides* red tides in the coastal seawaters around Yeosu and Tongyeong, Korea, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 52, No. 10, pp. 1249-1259.

Lee, Z., Ahn, Y.H., Mobley, C., and Arnone, R. (2010), Removal of surface-reflected light for the measurement of remote-sensing reflectance from an above-surface platform, *Optics Express*, Vol. 18, No. 25, pp. 26313-26324.

Lee, Z., Carder, K.L., Mobley, C.D., Steward, R.G., and Patch, J.S. (1999), Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization, *Applied Optics*, Vol. 38, No. 18, pp. 3831-3843.

Moon, J.E., Park, Y.J., Ryu, J.H., Choi, J.K., and Ahn, J.H. (2012), Initial validation of GOCI water products against in situ data collected around Korean peninsula for 2010–2011, *Ocean Science Journal*, Vol. 47, No. 3, pp. 261-277.

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-Oceans*, Vol. 103, No. C11, pp. 24937-24953.
- Park, T.G., Lim, W.A., Park, Y.T., Lee, C.K., and Jeong, H.J. (2013), Economic impact, management and mitigation of red tides in Korea, *Harmful Algae*, Vol. 30, pp. S131-S143.
- Shang, S., Lee, Z., Lin, G., Hu, C., Shi, L., Zhang, Y., Li, X., Wu, J., and Yan, J. (2017), Sensing an intense phytoplankton bloom in the western Taiwan Strait from radiometric measurements on a UAV, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 198, pp. 85-94.
- Son, H. (2018), Korean coast guard monitors red tide using drones equipped with a high-performance camera, *Yonhap News*, Incheon, <http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2018/08/07/0200000000AKR20180807092400065.HTML> (last date accessed: 9 August 2018).