

북극해 해수 광 특성 분석을 위한 2019 현장 관측 자료 수집

이성재, 김현철*

극지연구소 원격탐사빙권정보센터, 인천 21990, 대한민국

In-situ Measurement of the Arctic Ocean for Optical Property Analysis During 2019 Cruise

Sungjae Lee, Hyun-Cheol Kim*

Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

Received: 22 December 2020, Revised: 23 December 2020, Accepted: 24 December 2020

요약문 최근 지구 온난화로 북극권에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다. 온난화로 인한 해빙의 감소는 지구시스템에서 냉각 기능을 담당하던 에너지 균형에 변화를 주고 있다. 해양과 대기, 빙권 등의 변화는 북극의 생태학적인 변화에도 영향을 주고 있다. 인간의 접근이 어렵고 광역의 공간에서 일어나는 북극 환경변화를 파악하기 위해서 인공위성 원격탐사 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만, 해색 원격탐사의 경우 태양 고도가 낮은 극지방의 특성에 의해 중위도권의 경험자료를 바탕으로 만들어진 기존의 알고리즘 적용에 한계가 있다. 지속적인 극지역 현장조사 자료수집을 통해서 북극권에 적합하도록 해색 원격탐사 알고리즘을 개선하고 개발해야 한다. 본연구논문은 쇄빙연구선 아라온호로 2019년 북극해 연구항해에서 획득된 해양 관측 자료에 대해 보고하고자 한다. 획득 항목은 엽록소-a(Chlorophyll-a) 및 부유물질(Suspended Sediment) 농도, 해수의 고유 광 특성 및 겉보기 광 특성(Apparent optical property) 관측 자료이다. 측정된 결과 북극해는 고유 광 특성(Inherent optical property)에서 용존유기물의 영향이 크게 나타났다. 본 자료는 북극해 해양의 광 특성 분석을 통한 해색 원격탐사 알고리즘 개선 및 개발에 활용될 것이다.

주요어: 북극해, 아라온, 해색원격탐사, 고유 광 특성, 겉보기 광 특성

Abstract The Arctic issue has increased due to global warming. The Arctic is losing the role of cooling because reducing sea ice by warming on the Arctic, which is changing the energy balance on the Earth system. Change of Arctic ocean, atmosphere, and cryosphere influence on an ecosystem of Arctic as well. These changes are monitoring by remote sensing due to the Arctic is difficult for human access, and where is a wide area. However, a low solar altitude on the Arctic limits Ocean Color Algorithms applies to the Arctic because most ocean color algorithms are based on empirical data in the mid-latitude. Continuous data sampling on the Arctic ocean is the best way to improve and develop a suitable ocean color algorithm for the Arctic. This paper aims to report ocean observation data acquired by Ice-Breaker research vessel Araon during the summer Arctic expedition of 2019. Acquired samples are chlorophyll-a, suspended sediment concentration, in-situ measured ocean optical properties. Sampled data showed that there is a significant effect of dissolved organic matter in its inherent optical properties. We use these data for the aims of improving and develop ocean color algorithms in the Arctic.

keywords: Arctic sea, IBRV ARAON, Ocean Color Remote Sensing, Inherent optical property, Apparent optical property

*Corresponding author: kimhc@kopri.re.kr

1. 서문

전 세계 해수온은 20세기 이후로 지속적으로 증가하고 있다(Church and White, 2006; Miller and Douglas, 2004; Iz, 2018; Khan et al., 2020). 특히 극지방의 해수온 변화는 전세계 평균 온도상승률 보다 두배 가까이 크다고 보고되고 있다(Graff et al., 2019). 해수온의 증가는 해양, 대기, 빙권 등 지구시스템에 영향을 주게 된다. 최근 다양한 논문에 의하면 가까운 미래에 여름철 북극 해빙이 사라질 것이라는 예측이 보고되고 있다(Overland and Wang, 2013; Guarino et al., 2020). 해빙의 소멸은 태양 복사에너지의 감소로 인한 알베도 변화를 야기시키며, 해양과 대기 사이의 단열층의 감소로 이어지게 된다. 복합적인 기후변화로 인한 해양의 물리적인 변화가 어떤 생태학적인 영향을 주는지 규명이 필요하다.

접근이 어려운 극지를 지속적으로 관측하기 위해서 인공위성, 항공기, 연안의 고정센서 등 원격탐사기법을 이용한 해양환경 관측이 다양하게 이루어지고 있다. 하지만 극지역은 태양 고도가 낮은 고위도 지역으로 인한 열악한 태양 에너지 조건을 가지고 있어 해색(Ocean color) 원격탐사를 이용한 북극 해양의 특성을 측정하기엔 한계가 있다. 또한 해빙에 의해 일반적인 중위도 해양과는 다른 특성을 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 북극해에서 직접 수집한 해수 샘플링 자료를 이용한 극지 해색 알고리즘 추정이 필요하다(Son and Kim, 2018). 해색 자료는 해수 중에 존재하는 유기물과 무기물 등의 입자들에 의한 흡광과 산란을 기반으로 한다. 해색 위성 알고리즘들은 대부분 온열대 해역에서 획득된 자료를 기반으로 개발되었기 때문에 극지방에서 기존의 해색 알고리즘들의 불확실성은 어떠한 지역보다도 높다. 지속적인 관측에 의한 자료의 검보정을 통해 불확실성이 줄어 들 수 있다. 극지연구소에서는 북극의 해양을 관측하기 위하여 정기적인 현장조사를 수행하고 있다. 해양환경 자료 수집을 위하여 엽록소(Chlorophyll-a), 부유물질(Suspended Sediment)의 농도 및 해수의 흡광계수(Absorption coefficient)를 측정한다. 측정된 자료는 해양의 생물학적인 특성분석에 활용된다.

2. 본론

쇄빙연구선 아라온호는 북극해 해양 및 빙권의 환경변화 관측을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 2019년 여름철 북극해 및 척치해를 포함하는 연구지역을 대상으로 연구항해를 진행하였다(Fig.1). 연속적인 해양환경 자료를 수집하기 위해서 항해 기간 동안 4-6시간마다 Underway 해수 샘플링을 진행하였으며, 연구정점에서는 Surface, Subsurface Chlorophyll Maximum (SCM), Bottom of photic zone 으로 총 3곳의 깊이에 대해서 샘플링이 이루어진다. 채수한 샘플은 National Aeronautics and Space Administration(NASA)의 해수분석 프로토콜에 따라 진행하였다(Mueller et al., 2003).

식물성 플랑크톤의 생체량을 대변할 수 있는 엽록소 농도의 측정은 채수한 해수를 25mm GF/F에 여과한다. 여과된 필터지는 90% 아세톤 6ml로 색소를 추출하고 암실에 밀봉하여 12 - 24시간 보관한다. 보관한 시료는 25CS 시린지 필터를 이용하여 여과하고 형광 광도계(Trilogy, Turner Designs)를 통해 형광도(F_{sample})를 측정한다. 형광도는 Eq. 1을 통해 엽록소 농도로 변환가능 하며, C_{stand} , F_{stand} 는 기준체의 농도와 형광도를 나타내며, V 는 아세톤의 사용량 및 여과한 해수의 양으로 단위는 리터이다.

$$CHL - a = C_{stand} * \left[\frac{F_{sample} - F_{blank}}{F_{stand} - F_{blank}} \right] * (V_{solvent} / V_{sample}) \quad \text{Eq. 1}$$

입자성 부유물질 농도의 측정은 필터 전의 무게와 필터 후 무게의 차이로 구할 수 있다. 필터 전 완전히 건조한 25mm GF/F 무게($W_{before\ filter}$)를 측정한다. 채수한 해수를 여과 후 60°C에서 6시간 이상 건조하여 부유물질을 제외한 수분을 완전히 제거한 필터 무게($W_{after\ filter}$)를 측정한다. 총 부유물질 농도는 Eq. 2로 나타낼 수 있다.

$$SS = \frac{(W_{after\ filter}) - (W_{before\ filter})}{V_{Volume\ of\ filtered\ sample}} - \text{Eq. 2}$$

모든 정점에서는 해수의 고유 광 특성(Inherent optical property, IOP)을 측정하였으며, 연구정점에서는 추가적으로 겉보기 광 특성(Apparent optical property, AOP)을 측정하였다. IOP는 phytoplankton, non-algal particles(NAP), colored dissolved organic matter(CDOM)에 대한 흡광계수를 대상으로 한다. 흡광계수는 매질을 투과하는 광속에 의하여 단위 거리 당 흡수되는 광 에너지의 크기를 말한다. 여과된 필터를 UV-VIS Spectrophotometer (Carry-100, Agilent technology) 내부 광전판에 부착하여 광학밀도(Optical Density, OD) 혹은 흡광도(Absorption, Abs.)를 측정한다. OD는 Eq. 3을 통하여 흡광계수를 산출하는데 사용할 수 있다.

$$\alpha(\lambda) = 2.303 \frac{OD(\lambda) * S}{V\beta} \quad \text{Eq. 3}$$

S는 필터의 넓이(m^2), V는 필터한 해수의 부피(m^3)를 나타낸다. β 는 필터와 입자사이의 상호작용에 의한 pathlength amplification 보정 계수이다. 필터 직후 측정된 값은 $OD_{particle}$ 로 총 입자에 의한 흡광도이다. $OD_{particle}$ 측정이 완료된 필터에 100% 메탄올을 10ml 첨가하여 여과한다. 여과된 필터는 메탄올 15ml에 담가두어 색소가 메탄올과 충분히 반응하여 제거되도록 한다. 이후 동일한 방법으로 OD_{NAP} 를 측정하여 Eq. 3을 이용하여 흡광계수 $a_{NAP}(\lambda)$ 를 얻을 수 있다.

용존유기물의 흡광계수는 채수된 해수로부터 25Jp 멤브레인 시린지 필터를 이용하여 여과한다. 여과된 해수는 10cm 길이의 석영 큐벳에 담아 흡광도를 측정할 수 있으며 Eq. 4로 환산할 수 있다.

$$a_{cdom}(\lambda) = 2.303 \frac{OD_{cdom}(\lambda)}{l_{length\ of\ cubet(m)}} - \text{Eq. 4}$$

겉보기 광 특성을 측정하기 위하여 In-water radiometer 인 TriOS-RAMSES로 해양의 겉보기 광 특성을 측정하였다 (Russmeier and Zielinski, 2016). 측정은 해수 샘플링과는 다르게 쇄빙연구선의 움직임이 정지하는 연구정점에서만 이루어진다. 연구선의 후면 데크에서 해수표층에서부터 유광층까지 측정한다. 해수면의 Sun glint 효과와 연구선에 의해 발생하는 그림자를 최소화하기 위하여 태양의 방향을 고려하여 측정하였다. 연구장비는 해수 표층에서 대기하여 압력초기화 단계를 거쳐 유광층까지 내려가며 1초 간격으로 측정한다. TriOS-RAMSES는 상향복사휘도($L_u(\lambda)$, *Upwelling Radiance*) 및 하향복사조도($E_d(\lambda)$, *Downwelling irradiance*), 상향복사조도($L_d(\lambda)$, *Upwelling irradiance*)를 측정한다. 또한 측정 당시의 기상상태 및 태양에너지의 관측을 위하여 연구선에 수직으로 고정시켜 하향복사조도 $E_s(\lambda)$, *Downwelling solar irradiance*를 관측한다. 해수의 원격반사도 R_{rs} , *Remote surface reflectance*는 총 수출광량과 하향복사조도의 비로 표현할 수 있다(Eq. 5). $\eta(\lambda)$ 는 프레넬 굴절계수, $\rho(\lambda, \theta)$ 는 프레넬 반사계수이다. 이를 통하여 해수표면의 원격반사도 및 해수의 깊이별 반사도, 수출광량을 알아낼 수 있다.

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{(L_w(0^+, \lambda))}{(E_d(0^+, \lambda))} = \frac{L_u(0^-, \lambda) \frac{1 - \rho(\lambda, \theta)}{(\eta^2(\lambda))}}{(E_s(\lambda))} \quad \text{Eq. 5}$$

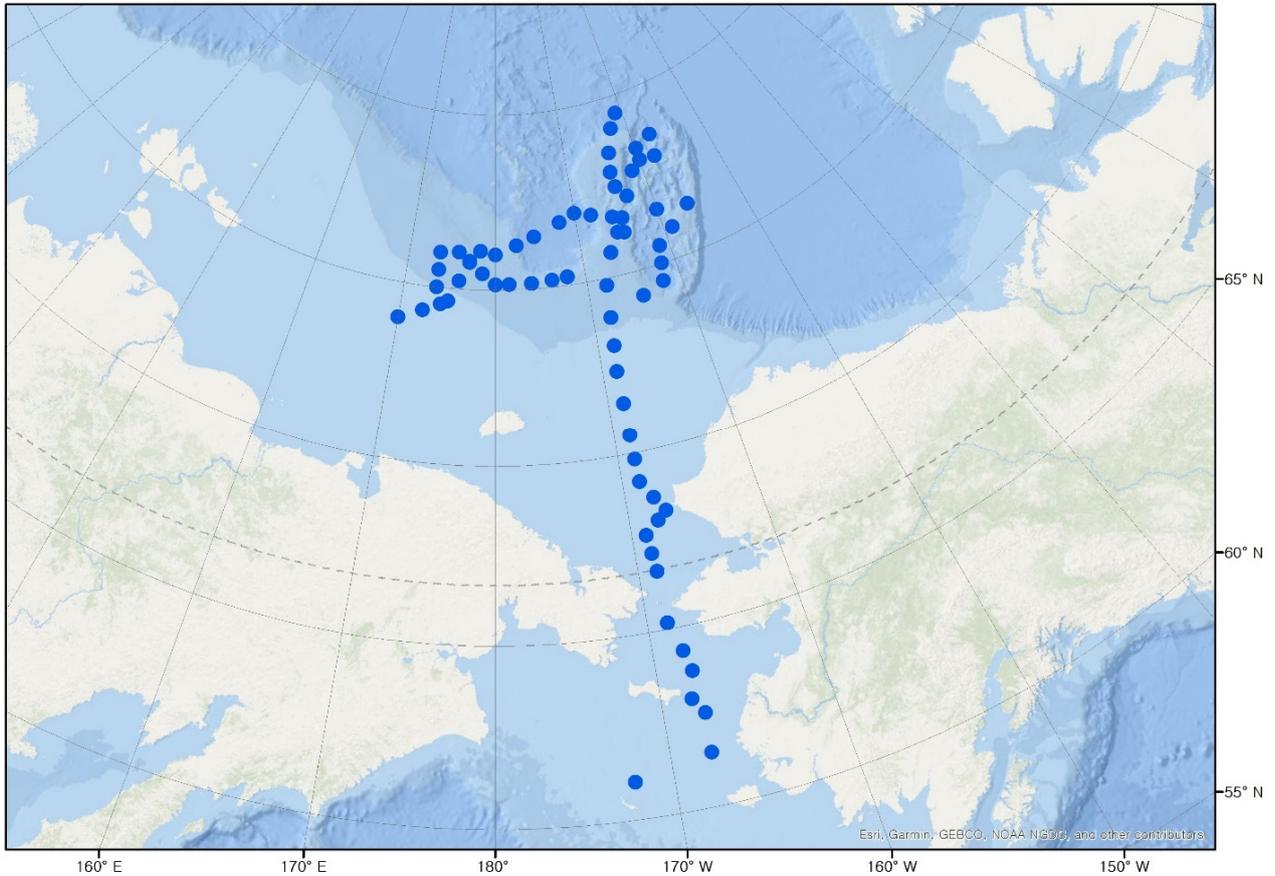


Fig. 1. Map of the research point locations in 2019 Arctic research cruise

3. 결과

베링해 및 척치해, 북극해를 포함하는 연구지역을 매년 관측하고 있어 연간 변화를 알아보기 위하여 연간자료로 정리하였다. Fig. 2는 2019년 연구항해를 통해서 얻은 북극해 해수의 고유 광 특성 측정 결과이다. SCM와 유광층의 바닥을 포함한 약 160지점의 깊이에 따른 흡광계수 측정하였다. 북극해의 해수는 Fig.2의 붉은 선으로 표시한 유색 용존유기물의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 높은 용존유기물의 분포는 담수 유입을 통한 육상기원 CDOM의 공급, 연안의 활발한 일차생산을 통한 자생기원 CDOM 공급으로 볼 수 있다. 육상기원의 가능성은 연구정점에서 측정한 깊이별 자료를 통해서 확인이 가능하다.

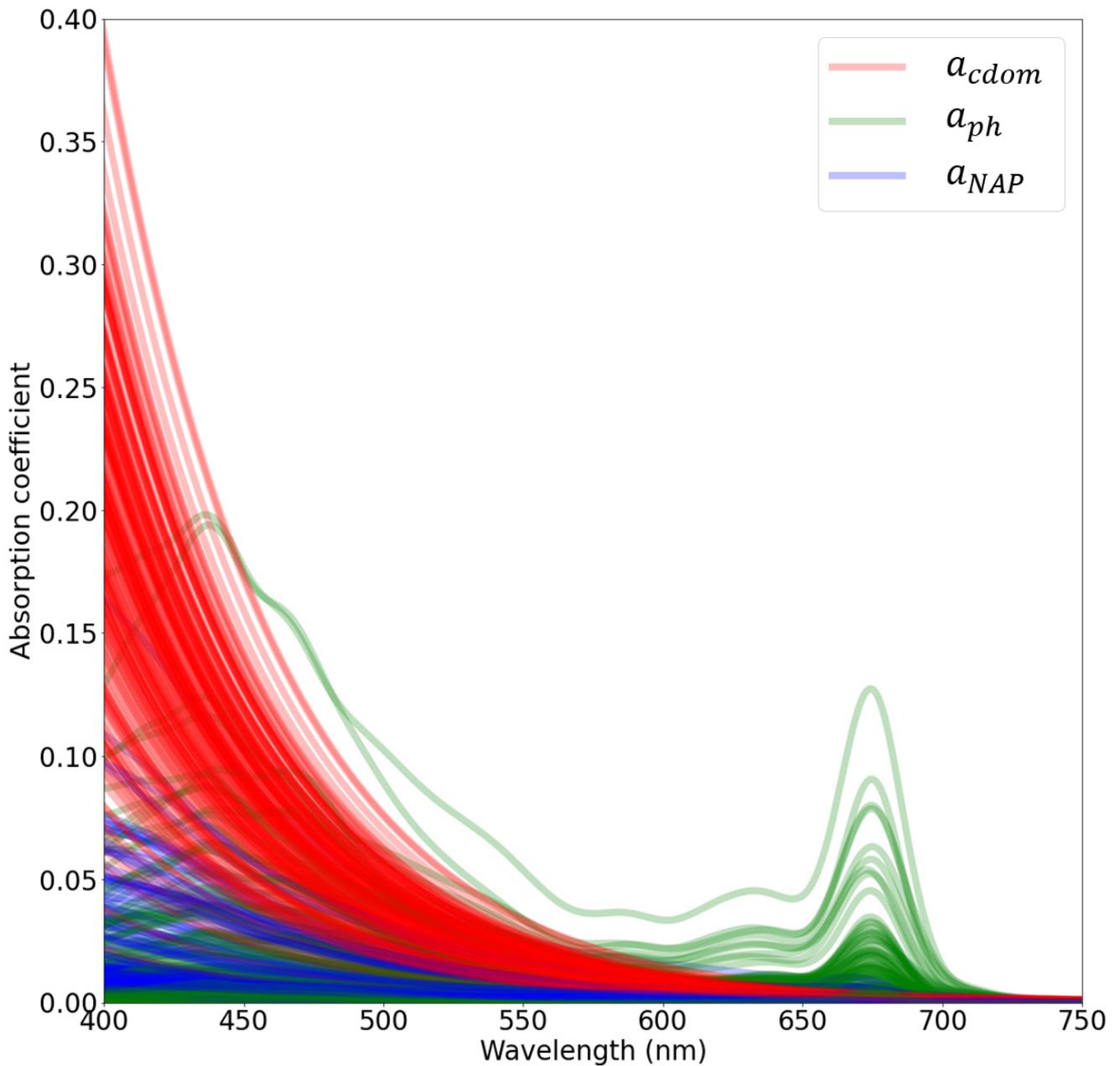


Fig. 2. Absorption coefficient of CDOM(red), Phytoplankton(green), NAP(blue) in the research area

겉보기 광 특성자료 수집을 위하여 연구정점에서 TriOS-RAMSES를 활용하여 원격반사도를 측정하였다(Fig. 3). 각 측정지역에 따른 반사도는 다른 특성을 가지며 나타나고 있다. Green(550nm 부근) 영역의 파장대에서 강하게 나타나는 지역이 있으며, Blue(460nm 부근) 영역이 강하게 나타나는 지역 등 시기 및 위치에 따른 특성을 보여주고 있다.

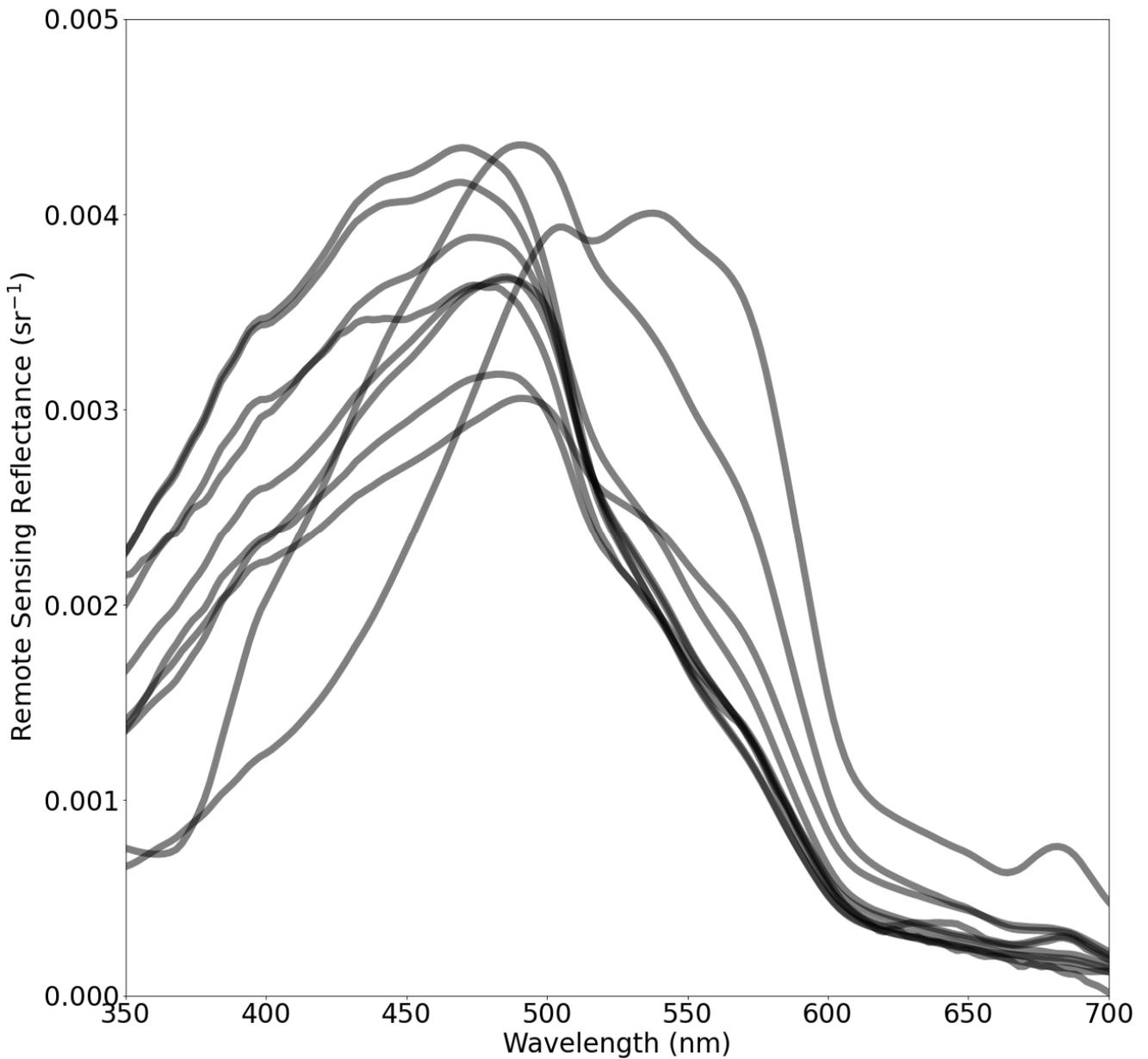


Fig. 3. Spectra spectrum of the RAMSES remote sensing reflectance in the research area 2019.

4. 결론 및 토의

북극해는 기후변화로 인한 변화가 다른 지역에 비해 크게 나타나는 지역이다. 특히 주 연구지역인 베링해, 척치해, 보퍼트 해 등은 겨울철에 해빙으로 가득차 있지만 여름철에는 대부분 해빙이 녹는 계절적 해빙지역에 속한다. 계절적 해빙지역은 해양 생태계에 큰 영향을 주는 식물성 플랑크톤의 증식, 부유물의 변화가 많은 지역으로 과학적인 관측이 요구된다. 하지만 극지라는 접근이 어려운 조건을 가지고 있어 원격탐사 기법을 이용한 방법을 통한 해양 관측방법이 여러 연구를 통해 진행되고 있다. 원격탐사 기법은 정확한 현장조사가 뒷받침되어야 정확한 알고리즘을 추정할 수 있다. 본 자료는 2019년 쇄빙연구선 아라온호를 이용한 북극해 현장조사를 통해 수집하였다. 수집된 자료는 위치 및 해수 깊이가 다양하여 해양의 다양한 특성을 보여주고 있다. 향후에는 수집자료를 이용하여 북극해 해양을 관측하는 해색 위성자료의 검보정 뿐만 아니라 연구지역

의 광 특성을 파악할 수 있는 자료로 활용할 수 있을 것이다.

5. 사사

이 연구는 극지연구소의 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구(PE20080) 연구과제의 지원으로 수행되었습니다.

6. 참고문헌

- Church J, White N (2006) A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* 33(1).
- Graff L, Iversen T, Bethke I, Debernard J, Seland Ø, Bentsen M, Olivie D (2019) Arctic amplification under global warming of 1.5 and 2° C in NorESM1-Happi. *Earth System Dynamics* 10(3):569-598.
- Guarino M, Sime L, Schröder D, Malmierca-Vallet I, Rosenblum E, Ringer M, Wolff E (2020) Sea-ice-free Arctic during the last interglacial supports fast future loss. *Nature Climate Change* 10(10):928-932.
- Iz H (2018) Is the global sea surface temperature rise accelerating? *Geodesy and Geodynamics* 9(6):432-438.
- Khan S, Bjørk A, Bamber J, Morlighem M, Bevis M, Kjær K, Zhang B (2020) Centennial response of Greenland's three largest outlet glaciers. *Nature Communications* 11(1):1-9.
- Miller L, Douglas B (2004) Mass and volume contributions to twentieth-century global sea level rise. *Nature* 428(6981):406-409.
- Mueller J, Morel A, Frouin R, Davis C, Arnone R, Carder K, McLean S (2003) Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 4. In: Mueller JL, Fargion GS, McClain CR (eds) Volume III: Radiometric measurements and data analysis protocols. Goddard Space Flight Space Center, pp 1-63
- Overland J, Wang M (2013) When will the summer Arctic be nearly sea ice free? *Geophysical Research Letters* 40(10):2097-2101.
- Russmeier N, Zielinski O (2016) A novel method of measuring upwelling radiance in the hydrographic sub-hull. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications* 11:16003.
- Son Y, Kim H (2018) Empirical ocean color algorithms and bio-optical properties of the western coastal waters of Svalbard, Arctic. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 139:272-283.

7. 데이터셋에 대한 메타데이터

Sort	Field	Subcategory#1	Subcategory#2	
Essential	Title	Ocean optical property of Arctic ocean		
	*DOI name	10.22761/DATA2020.2.2.060		
	*Category	oceans	OCN	
	Abstract			
	*Temporal Coverage	2019.07.17.-2019.08.25.		
	*Spatial Coverage	latitude : 60 °N ~ 80 °N longitude : 170 °E ~ 150 °W		
	*Personnel	Name		Hyun-Cheol Kim
		Affiliation		KOPRI
E-mail			kimhc@kopri.re.kr	
*License	CC BY-SA			
Optional	*Project	PE20080	Study on remote sensing for quantitative analysis of change in the Arctic cryosphere	
	*Instrument	Spectrophotometer	Manufacturer : Agilent technology Model name : Carry-100	
		Fluorometer	Manufacturer : Turner designs Model name : Trilogy	
		In-water hyperspectral radiometer	Manufacturer : TriOS Model name : RAMSES	