

Landsat-8 OLI를 이용한 북극해 스발바드 피요르드의 고해상도 Ocean Color Product 산출

김상일 · 김현철[†] · 현창욱

극지연구소 극지해양환경연구부

High Resolution Ocean Color Products Estimation in Fjord of Svalbard, Arctic Sea using Landsat-8 OLI

Sang-il Kim, Hyun-Cheol Kim[†] and Chang-Uk Hyun

Division of Polar Ocean Environment, Korea Polar Research Institute

Abstract : Ocean Color products have been used to understand marine ecosystem. In high latitude region, ice melting optically influences the ocean color products. In this study, we assessed optical properties in fjord around Svalbard Arctic sea, and estimated distribution of chlorophyll-a and suspended sediment by using high resolution satellite data, Landsat-8 Operational Land Imager (OLI). To estimate chlorophyll-a and suspended sediment concentrations, various regression models were tested with different band ratio. The regression models were not shown high correlation because of temporal difference between satellite data and in-situ data. However, model-derived distribution of ocean color products from OLI showed a possibility that fjord and coastal areas around Arctic Sea can be monitored with high resolution satellite data. To understand climate change pattern around Arctic Sea, we need to understand ice melting influences on marine ecosystem change. Results of this study will be used to high resolution monitoring of ice melting and its influences on the marine ecosystem change at high latitude. KOPRI (Korea Polar Research Institute) has been operated the Dasan station on Svalbard since 2002, and study was conducted using Arctic station.

Key Words : Landsat-8 OLI, Ocean Color, Arctic, Fjord, Svalbard

요약 : Ocean Color product들은 해양 생태계를 이해하기 위해 중요한 변수이다. 고위도 지역에서는 해빙이 바다로 유입되어 ocean color product에 광학적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 북극 다산기지 근해의 피요르드에 대한 광학적 특성을 평가하고 높은 공간해상도를 가진 Landsat-8 OLI 영상의 엽록소-a(chlorophyll-a)와 부유물질(suspended sediment) 농도를 산출하고자 한다. 엽록소-a와 부유물질 농도를 추정하기 위해서 band ratio를 이용한 다양한 회귀 모델을 테스트했다. 위성영상과 관측된 실측 값과의

접수일(2014년 12월 3일), 수정일(1차 : 2014년 12월 23일), 게재확정일(2014년 12월 23일).

[†] 교신저자: 김현철(kimhc@kopri.re.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.

시간적인 차이 때문에 사용된 회귀모델은 높은 상관관계를 가지지는 못하였다. 하지만 Landsat-8 OLI 영상을 이용한 모델에서 생산된 엽록소-a와 부유물질 농도는 북극해 주변 피요르드와 해안지역에 대한 고해상도 위성 데이터를 활용한 모니터링 가능성을 보여주었다. 북극해 주변의 기후변화 패턴을 이해하기 위해서는 해양 생태계 변화에 ice melting이 어떠한 영향을 미치는지를 이해하는 것이 필요하다. 본 연구의 결과는 고위도지역에서 ice melting이 해양생태계 변화에 미치는 영향을 고해상도로 모니터링을 하는데 사용된다. 극지연구소는 2002년부터 스발바드 다산기지를 운영하고 있으며 한국의 북극 기지를 기반으로 연구를 수행하였다.

1. Introduction

엽록소-a(chlorophyll-a)와 부유물질(suspended sediment) 농도와 같은 ocean color product들은 해양생태계를 이해하는데 중요한 인자들이다. 특히 고위도지역 연안의 ice melting은 ocean color products에 광학적 특성에 영향을 미치지만 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)와 Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS)와 같은 해상 위성자료는 낮은 공간해상도로 인해 좁은 만이나 연안지역에 대한 관측이 제한적이다. 또한 빙하가 녹아 유입되는 북극해 해양환경 변화를 모니터링하고 기후변화와의 관계를 규명하는 것에는 한계가 있다. 따라서 북극해 주변의 기후변화 패턴을 이해하기 위해 해양 생태계 변화와 ice melting이 어떠한 영향을 미치는지를 보다 고해상도 영상을 통해 이해하는 것이 필요하다.

위성센서에서 측정된 분광 정보는 물의 광학 특성에 영향을 미치는 ocean color products와 상관관계를 가지며 (Bilgehan *et al.*, 2010) 이러한 상관관계를 통해 ocean color products를 산출하기 위한 원격탐사 기술들이 개발되었다. 그 중 band ratio 모델은 대기의 영향을 상쇄시키는 효과를 가지는 이점이 있고 여러 개의 분광 밴드를 사용하는 경우 물 표면에서의 광의 산란 및 흡수 특성을 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다(Jensen, 2005; Dekker *et al.*, 1991). Band ratio 모델을 사용하는 경우 기본적으로 흡수 및 산란 기능을 대표하는 분광 영역 대를 선택하는 것이 중요하며(Han, 1997) 기존 연구에서는 400 nm에서 900 nm 사이의 파장영역을 이용하여 연구를 수행하였다(Han *et al.*, 1994; Han and Rundquist, 1997; Gin *et al.*, 2002). Band ratio를 이용한 다양한 회귀 모델을 테스트하기 위해 단순 회귀 모델(bivariate regression model)과 다변량 회귀 모델(multiple regression model)을 이용하였고, 그 중 다변량 회귀모델은 Landsat의 반사도와 ocean color

product들간의 관계를 구축하기 위해 보편적인 많이 사용되는 회귀 모델이다 (Harma *et al.* 2001; Cohen *et al.*2003; Giardino *et al.* 2007). 본 연구에서는 자료 획득과 다양한 분광영역을 가지는 Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) 데이터를 이용하였다. 특히 Landsat 지구관측 위성은 영상의 분광 해상도는 ocean color products 정량화에 적절히 사용될 수 있는 이점을 가지며(Yang, 2005) 공간 해상도(30 m)는 연안지역을 모니터링하기에 적합하다.

본 연구는 북극 다산기지 근해의 북극 빙하 피요르드에 대한 광학적 특성을 이용하여 높은 공간해상도를 가진 Landsat-8 OLI 영상의 엽록소-a와 부유물질 농도를 산출을 위한 사전 연구로서 Svalbard내에 북극다산기지가 있는 피요르드(Kongsfjorden와 Krossfjorden)의 광학 특성을 평가하고 Landsat-8 OLI 위성 영상을 활용한 고해상도 엽록소-a와 부유물질 농도를 산출하고자 한다.

2. Study area and data sets

1) Study area

다산기지가 위치해 있는 콩스피요르텐(Kongsfjorden)과 크로스피요르텐(Krossfjorden) (74°N - 81°N and 10°E - 35°E)은 노르웨이령 스발바드 군도(Svalbard Archipelago)의 스피츠베르겐(Spitsbergen) 섬 니알슨(Ny-Alesund) 지역에 위치해 있으며 스발바르 지역은 4월에서 8월은 낮이 계속되고, 10월에서 2월까지의 밤이 계속되는 환경을 가지고 있다. 또한 여름철의 평균 기온은 5°C 내외이며 겨울철은 평균 영하 15°C 내외이다. 연평균 강우량은 370 mm로 북극의 사막으로 불리기도 한다. 또한 고위도 지방임에도 불구하고 따뜻한 북대서양과 걸프해류

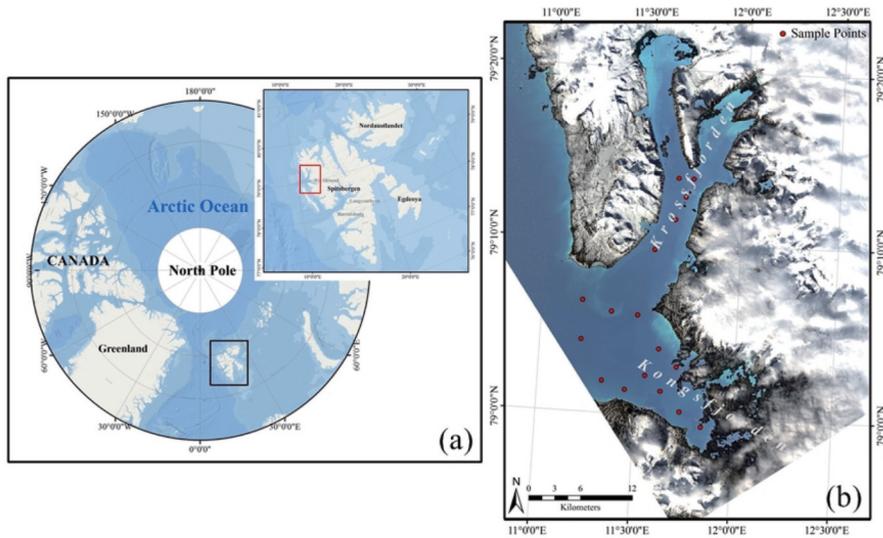


Fig. 1. Location of the study area: (a) Red box indicates the study area and (b) points on the fjord area refer to sampling locations on Landsat-8 OLI multispectral image data acquired on June 9, 2013.

의 영향으로 동쪽해안에 비해 온난한 곳이다. 연구지역인 다산기지 근해의 피요르드 중 콩스피요르덴은 대략 20 km의 길이로 남동쪽에서 북서쪽으로 발달해 있고 4 km에서 10 km의 변동폭을 가진다. 크로스피요르덴은 길이가 30 km 정도로 북서쪽으로 발달해있으며 3 km에서 6 km의 폭을 가진다(Fig. 1). 또한 두 피요르드는 tidewater glacier에 강한 영향을 받는다(Svendsen *et al.*, 2002). 또한 북극해 주변해역은 연 중 낮은 기온을 보이고 그 변화폭도 작다. 특히 북극의 여름은 겨울보다 불안정한 기후를 나타내는 것으로 알려져 있다.

2) Datasets and method

(1) Ground reference data

현장관측 데이터들은 지역적인 특수성으로 인하여 해당지역의 날씨와 상황을 고려하여 2013년 6월 29일부터 30일까지 북극 다산기지 주변 콩스피요르덴과 크로스피요르덴 지역에서 획득한 샘플 데이터를 이용하였고 총 2일간 관측한 샘플 데이터의 정점(35개) 중 Landsat-8 OLI 영상의 구름지역을 제외한 17개의 관측 포인트 데이터만을 이용하여 연구를 수행하였다(Fig. 1(b)). 관측된 엽록소-a와 부유물질 농도의 값은 Table 1과 같으며 엽록소-a 농도의 경우 크기는 3.3 mg m^{-3} 작게는 0.2 mg m^{-3} 가 관측이 되었고 부유물질 농도는 17.4 mg l^{-1} 에서 51.6 mg l^{-1} 까지 관측 되었다.

Table 1. Descriptive statistics quantity of chlorophyll-a and suspended sediment over the field survey

	Chlorophyll-a (mg m^{-3})	suspended sediment (mg l^{-1})
Max.	3.2651	51.6
Min.	0.2023	20.0
Med.	1.1239	18.6
Mean	1.2507	17.4

(2) Satellite data: Landsat-8 OLI

본 연구에서는 2013년 2월 11일에 발사된 Landsat-8 OLI 지구관측 위성을 이용하여 연구를 수행하였으며 해당 위성의 제원은 Table 2와 같다.

Landsat-8 위성은 2개의 센서(Operational Land Imager, OLI; Thermal InfraRed Sensor, TIRS) 페이로드를 이용하여 데이터의 지속적인 수집과 가용성을 가지며 2개의 센서는 각각 9개의 단파 밴드와 2개의 장파 밴드 대역에 대한 데이터를 수집한다. 또한 기존 연구에서 사용한 밴드는 클로로필-a의 흡수 및 산란 기능을 대표하는 분광 영역대인 400 nm에서 900 nm 사이에 해당하는 Band 2, Band 3, Band 4와 Band 5 자료를 이용하였지만 coastal 밴드인 Band 1이 추가되어 자료의 활용이 더 용이하다. 본 연구에서 사용한 Landsat-8 OLI 위성영상의 장파장 영역은 ocean color product 산출을 위한 충분한 정보를 제공 해주지 못하기 때문에(Bilge *et al.*, 2003; Dekker *et al.*, 2002) 본 연구의 분석을 위해 Band 1-5를 이용했다.

Table 2. Landsat OLI and TIRS band designations

	Spectral bands		Wavelength(micrometers)	Resolution(meters)
	OLI Spectral Bands	Band 1	Coastal/aerosol	0.433-0.453
Band 2		Blue	0.450-0.515	30
Band 3		Green	0.525-0.600	30
Band 4		Red	0.630-0.680	30
Band 5		NIR	0.845-0.885	30
Band 6		Short Wavelength Infrared	1.560-1.660	30
Band 7		Short Wavelength Infrared	2.100-2.300	30
Band 8		panchromatic	0.500-0.680	15
Band 9		cirrus	1.360-1.390	30

전처리 과정으로 대기보정은 Dark Object Subtraction technique (DOS) 방법으로 수행되었으며 이는 대기보정을 단순화시키기 위해 개발된 이미지기반 모델이다. 또한 각각의 현장 관측 데이터들의 샘플 포인트의 오차를 줄이기 위해 Landsat-8 OLI 영상에서 해당 픽셀의 주변 3×3 픽셀을 평균하여 사용하였다(Wang *et al.*, 2006). 본 연구에서는 이전 연구를 기반으로 광학특성에 따른 band ratio 모델을 이용하여 연구를 수행하였으며 적합한 밴드 결합을 위해 단순 회귀 모델과 다변량 회귀 모델의 통계분석을 수행했다. 또한 연구에 사용한 Landsat-8 OLI 위성영상은 관측 값과 비슷한 시기의 2013년 6월 9일 자료로 현장 관측 자료의 시간적 차이를 감안하여 연구를 수행하였다.

(3) Auxiliary data

보조자료로 사용한 MODIS 센서는 Terra/Aqua 위성 에 탑재되어 지구관측시스템 (Earth Observing System, EOS)의 일환으로 운용 중이다. 연구에서는 MODIS Aqua L3 Seasonal composite Sea Surface Temperature (SST)를 이용하였고 해당 연구 시기를 포함한 데이터 기간은 2013년 6월 21일부터 2013년 9월 20일 합성자료이며 공간해상도는 4 km이다.

3. Result and Discussion

Band ratio는 Landsat-8 OLI 영상자료에 해당하는 채널 별 분광 반사도와 현장 관측한 엽록소-a와 부유물질 농도의 상관분석을 수행하였으며, ocean color products 산출을 위한 Landsat-8 OLI 데이터와 관련된 회귀 모델

Table 3. Bivariate regression models and Determination Coefficients (R²)

Parameters	Independent (Landsat OLI Bands)	R ²
Chlorophyll-a	Band1 / Band 2	0.511
	Band 2 / Band 1	0.512
	Band 2 / Band 3	0.426
Suspended Sediment	Band 2 / Band 4	0.559
	Band 2 / Band 5	0.508
	Band 3 / Band 4	0.510

결과는 Table 3과 Table 4와 같다. Table 3은 밴드 결합을 통한 단순 회귀분석 모델 결과이며, 반면에 Table 4는 다변량 회귀분석 모델 결과를 나타낸다.

단순 회귀분석 모델은 band 1 - band 5의 band ratio 모델 중 상관관계가 높은 3 가지를 Table 3에 나타내었다. 그 중 엽록소-a는 band 1과 band 2의 밴드 조합에서 상대적으로 R²가 0.5 이상의 상관 관계를 보였고 band 1 / band 2보다는 band 2 / band 1에서 좀더 높은 상관관계 (R² = 0.512)를 보였다. 부유물질 농도는 band 2와 band 4에서 타 밴드 조합에서 보다 높은 상관관계를 보였다(R² = 0.559). 또한 단순 회귀분석 모델에서 알 수 있듯이 Landsat-8 OLI의 band 2(0.450-0.515 μm)의 분광 신호가 엽록소-a와 부유물질 농도에 강한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Table 4의 다변량 회귀분석 모델은 단순 회귀분석 모델과는 다르게 엽록소-a 농도는 band 2와 band 4의 band ratio와 추가적으로 band 2와 band 5의 조합으로 좀 더 높은 상관관계(R² = 0.601)를 보였으며 부유물질 농도에서는 band 2와 band 5의 band ratio와 band 1, band 2와 band 3의 조합으로 상대적으로 높은 상관관계(R²=0.651)를 보

Table 4. Multiple regression equations and Determination Coefficients (R²)

Parameters	Regression equations	R ²
Chlorophyll-a (Chl-a)	$Chl-a = 0.103 + 175.115 \times \text{band } 2 - 694.261 \times \text{band } 4 + 415.173 \times \text{band } 5$	0.534
	$Chl-a = -22.853 + 6.756 \times (\text{band } 2 / \text{band } 4) + 194.08 \times \text{band } 5$	0.530
	$Chl-a = -27.904 + 9.17 \times (\text{band } 2 / \text{band } 4) - 48.736 \times \text{band } 2 + 386.495 \times \text{band } 5$	0.601
Suspended Sediment(SS)	$SS = 0.003 + 0.002 \times (\text{band } 2 / \text{band } 5) - 0.522 \times \text{band } 1 + 0.839 \times \text{band } 2 - 0.288 \times \text{band } 3$	0.651
	$SS = 0.003 + 0.002 \times (\text{band } 2 / \text{band } 5) - 0.489 \times \text{band } 1 + 0.622 \times \text{band } 2$	0.637
	$SS = 0.017 - 0.552 \times \text{band } 1 + 0.785 \times \text{band } 2 - 0.589 \times \text{band } 5$	0.616
	$SS = 0.016 - 0.555 \times \text{band } 1 + 0.932 \times \text{band } 2 - 0.205 \times \text{band } 3 - 0.156 \times \text{band } 4 - 0.405 \times \text{band } 5$	0.626

였다. 단순 회귀분석 모델과 마찬가지로 다변량 회귀분석 모델에서도 band 2(0.450-0.515 μm)의 분광 신호가 엽록소-a와 부유물질 농도에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 단일 밴드 조합의 경우 엽록소-a 농도의 R²가 0.534를 보였고 band ratio를 이용한 방법은 R²가 0.530과 0.601을 보였다. 부유물질 농도에서는 단일 밴드 조합의 경우 0.616과 0.626의 R² 값을 보였으며 band ratio를 이용한 방법에서는 R²가 0.651과 0.637을 보였다. 따라서 band ratio를 이용한 방법이 좀 더 높은 상관관계를 나타내었다. 결과적으로 다변량 회귀분석 모델이 단순 회귀분석 모델 보다 더 높은 상관성을 가지는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 높은 상관성을 가지는 다변량 회귀분석 모델 중 최적의 모델을 선택하여 연구를 수행하였으며 그 식은 아래와 같다.

$$Chl-a = -27.904 + 9.17 \times (\text{band } 2 / \text{band } 4) - 48.736 \times \text{band } 2 + 386.495 \times \text{band } 5 \quad (1)$$

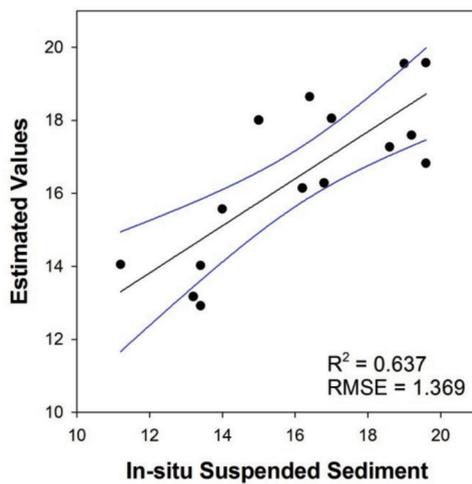
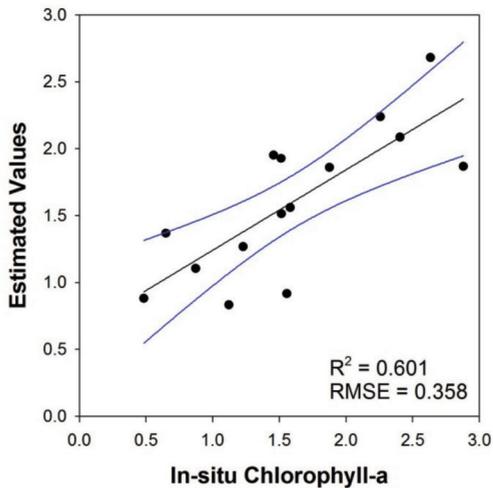


Fig. 2. Comparison of in-situ measured and satellite-estimated ocean color products using Landsat-8 OLI image: (a) chlorophyll-a and (b) suspended sediment.

$$SS = 0.003 + 0.002 \times (\text{band } 2 / \text{band } 5) - 0.522 \times \text{band } 1 + 0.839 \times \text{band } 2 - 0.288 \times \text{band } 3 \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)와 같이 산출된 회귀 방정식을 이용하여 Landsat-8 OLI 영상으로부터 엽록소-a와 부유물질 농도를 산출하였다(Fig. 2).

현장 관측 값과 Landsat-8 OLI 에서 산출된 값의 오차는 엽록소-a 농도는 대략 0.36 mg m⁻³, 부유물질 농도는 1.37 mg l⁻¹의 오차를 보여주었다. 엽록소-a 농도는 0.6의 상관계수 값을 부유물질 농도는 0.64의 상관계수 값을 보였으며 전반적으로 대략 60%의 정확도를 보였다. 이는 위성영상과 관측된 실측 값과의 시간적인 차이 때문에 사용된 회귀모델이 높은 상관관계를 가지지 못하였고, 짧은 기간의 관측 자료와 Landsat-8의 시간적 공간적 차이에 의한 영향이 있었을 것으로 생각된다.

Fig. 3은 산출된 회귀방정식을 이용한 Landsat-8 OLI 영상에 적용한 결과이며 엽록소-a 농도의 경우 값의 범

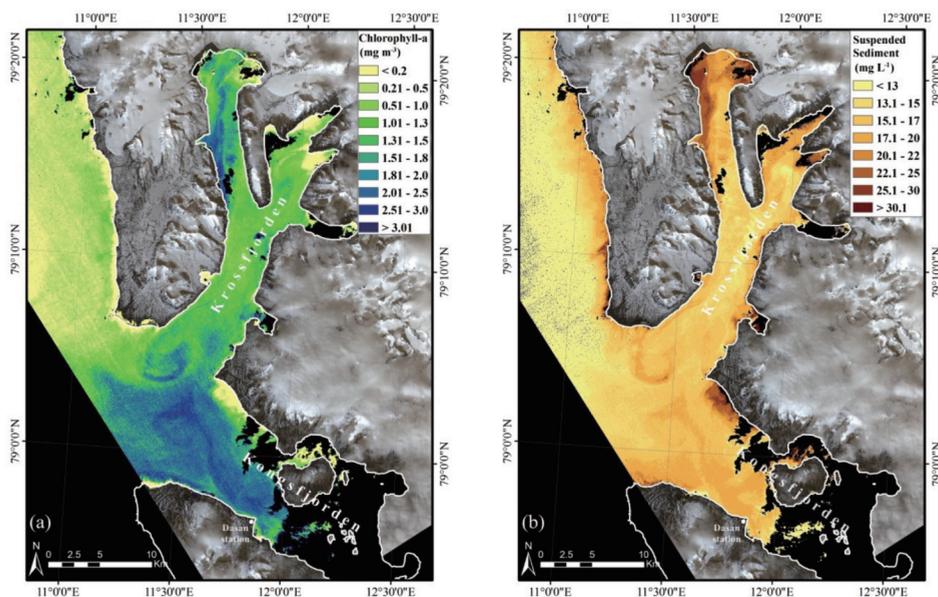


Fig. 3. Distribution of suspended sediment and chlorophyll-a parameters over the study area (Kongsfjorden and Krossfjorden around Arctic Dasan station in Svalbard) using Landsat-8 OLI image acquired on Jun 9, 2013: (a) chlorophyll-a and (b) suspended sediment.

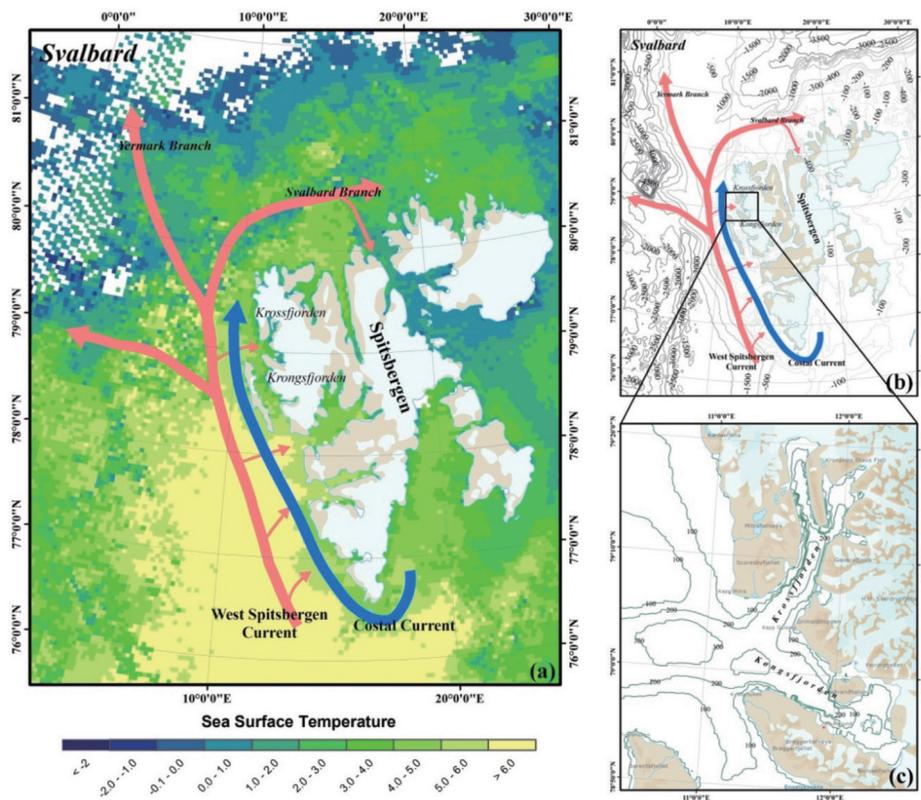


Fig. 4. (a) MODIS Aqua L3 Seasonal composite SST (Sea Surface Temperature): Jun 21, 2013 - Sep 20, 2013. (b) Map of Svalbard showing the sea bottom topography and major currents. Off the coast currents of western Spitsbergen are the West Spitsbergen Current (thick red) and the Arctic-type coastal water (blue). (c) detailed sea bottom topography map of Kongsfjorden and Krossfjorden area.

위가 $0 \sim 3.01 \text{ mg m}^{-3}$ 로 현장 관측 값의 범위인 $0.2 \sim 3.3 \text{ mg m}^{-3}$ (Table 1)과 비교하여보면 좋은 결과를 나타내었음을 알 수 있다. 또한 부유물질 농도의 경우 값의 범위가 $13 \sim 30 \text{ mg l}^{-1}$ 로 추정되었고 현장 관측 값의 범위인 $17 \sim 50 \text{ mg l}^{-1}$ (Table 1)과 비교하였을 때 다소 과소 추정됨을 알 수 있지만 시간적인 오차를 감안한다면 비교적 일치하는 경향을 보이는 것을 알 수가 있다. 또한 Fig. 3에서 산출된 엽록소-a와 부유물질 농도의 공간 분포를 살펴보았다. 일반적으로 크로스피요르텐보다 콩스피요르텐에서 엽록소-a와 부유물질 농도가 높은 것을 알 수 있고 부유물질 농도는 빙하가 녹아 유입되는 해안을 따라 높게 나타나며 엽록소-a 농도는 크로스피요르텐보다 콩스피요르텐에서 높은 농도 값을 보인다. 또한 크로스피요르텐 연안보다는 피요르드 중앙을 따라 엽록소-a와 부유물질 농도가 높은 것을 알 수 있다.

다산기지 주변 피요르드의 ocean color product들의 양상을 설명하기 위해 주변 해류와 온도의 영향을 살펴보았다. 본 연구지역인 북극 빙하 피요르드 지역은 스발바르 군도의 주변을 흐르는 해류에 의해 강한 영향을 받는다 (Fig. 4(b)). 특히 대서양 해류에서 북부로 확장하는 West Spitsbergen Current (WSC)는 북극해에 고온과 고염의 해류를 전달한다. Fig. 4(a)는 MODIS seasonal SST (2013년 6월 21일 ~ 2013년 9월 20일) 자료로 해당 연구해의 스피치베르겐 주변 SST를 나타내며 특히 북극의 여름철은 고온의 WSC의 Fjord 유입으로 연안해역의 해빙 및 유빙의 발생과 소멸에 영향을 미친다. 또한 이러한 영향으로 인해 해양으로 다량의 쇄설물들이 유입되고, 빙하가 녹는 부분과 맞닿은 ice-edge 부근에서 식물성 플랑크톤의 대 증식이 자주 발생한다는 것을 단적으로 보여준다. 이처럼 Landsat-8 OLI 영상을 이용한 모델에서 생산된 엽록소-a와 부유물질 농도는 북극해 주변 피요르드와 해안지역에 대한 고해상도 위성 데이터를 활용한 모니터링 가능성을 보여 주었다.

4. Conclusion

본 연구에서는 ocean color products와 Landsat-8 OLI의 밴드의 관계를 평가하고 Landsat-8 OLI 위성영상을 활용한 북극해 주변 연안과 피요르드의 모니터링 가능성을

알아 보았다. 이를 위해 band ratio를 이용한 다양한 회귀 모델을 수행했으며 그 중 최적의 모델을 선택하여 ocean color product인 엽록소-a와 부유물질 농도를 산출하였다. 회귀분석 결과에서 60%의 정확도를 보였으며 이는 현장관측과 위성영상 획득 사이의 시간적인 차이를 감안할 필요가 있음을 나타낸다. 또한 위성영상의 구름으로 인해 사용할 수 있는 현장관측 값이 상대적으로 부족하여 검증을 위한 단계가 제한적이며 훈련된 모형만을 이용한 결과를 제시하였다는 점에서 모형의 한계성을 가지고 있다. 하지만 본 연구는 Landsat-8 OLI 영상을 이용하여 모델에서 생산된 엽록소-a와 부유물질 농도는 북극해 주변 피요르드에 대한 고해상도 위성 데이터를 활용한 해양환경 모니터링 가능성을 보여주었다. 따라서 본 연구는 북극 빙하 피요르드의 ice melting에 의한 Ocean Color Products에 미치는 영향과 높은 공간해상도를 가지는 북극해 주변 연안과 피요르드의 해양환경 변화를 모니터링하는데 유용할 것이라 사료된다.

향후 연구에서는 다산기지 근해의 지속적인 관측을 통해 ocean color products의 산출의 정확도를 향상시키고 기후변화와 관련한 북극해 주변 환경변화를 파악이 필요하다. 또한 연구지역과 그 이외의 북극해 주변 연안이나 피요르드에 대한 연구를 위해 다중시기의 영상의 확보가 필요하다.

사사

이 논문은 항공우주연구원의 “위성정보공공활용” 사업의 일환으로 극지연구소 협동 연구인 “극지분야 위성 활용 연구(PG14010)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bilgehan, N., E. Semih, K. Hakan, B. Ali, and M. David, 2010. An Application of Landsat-5TM Image Data for Water Quality Mapping in Lake Beysehir, Turkey, *Water Air Soil Pollut.*, 212: 183-197.
- Bilge, F., B. Yazici, T. Dogeroglu, and C. Ayday, 2003.

- Statistical evaluation of remotely sensed data for water quality monitoring, *International Journal of Remote Sensing*, 24: 5317-5326.
- Cohen, W.B., T.K. Maier-Sperger, S.T. Gower, and D.P. Turner, 2003. An Improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data, *Remote Sensing of Environment*, 84: 561-571.
- Dekker, A.G., R.J. Vos, and S.W.M. Peters, 2002. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analysis of TM and SPOT sensor data, *International Journal of Remote Sensing*, 23: 15-35.
- Dekker, A.G., T.J. Malthus, and E. Seyhan, 1991. Quantitative modeling of inland water quality for high-resolution mss systems, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29: 89-95.
- Giardino, C., V.E. Brando, A.G. Dekker, N. Strömbeck, and G. Candiani, 2007. Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion, *Remote Sensing of Environment*, 109: 183-195.
- Gin, K.Y., S.T. Koh, and E.S. Chan, 2002. Application of spectral signatures and colour ratios to estimate chlorophyll in Singapore's coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55: 719-728.
- Han, L., 1997. Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algal-laden waters, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63: 701-705.
- Han, L. and D.C. Rundquist, 1997. Comparison of NIR/Red ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir, *Remote Sensing of Environment*, 62: 253-261.
- Han, L., D.C. Rundquist, L.L. Liu, and L.N. Fraser, 1994. The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment, *International Journal of Remote Sensing*, 15: 3707-3718.
- Harna, P., J. Vepsäläinen, T. Hannonen, T. Pyhälähti, J. Kamari, and K. Kallio, 2001. Detection of water quality using simulated satellite data and semiempirical algorithms in Finland, *Science of The Total Environment*, 268: 107-121.
- Jensen, J.R., 2005. *Introductory Digital Image Processing, A Remote Sensing Perspective* (Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall).
- Svendsen, H., A. Beszczynska-Møller, J.O. Hagen, B. Lefauconnier, V. Tverberg, S. Gerland, J.B. Ørbæk, K. Bischof, C. Papucci, M. Zajaczkowski, R. Azzolini, O. Bruland, C. Wiencke, J.G. Winther, and W. Dallmann, 2002. The physical environment of Kongsfjorden-Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard, *Polar Research*, 21(1): 133-166.
- Wang, F., H. Luoheng, K. Hsiang-Te, and B.V.A. Roy, 2006. Applications of Landsat-5 TM imagery in assessing and mapping water quality in Reelfoot Lake, Tennessee, *International Journal of Remote Sensing*, 27(23): 5269-5283.
- Yang, X., 2005. Remote sensing and GIS for estuarine ecosystem analysis: an overview, *International Journal of Remote Sensing*, 26: 5347-5356.