

Note

태평양 북극 결빙 해역 내 유색 용존 유기물 CDOM 분포에 따른
태양광 투과 비교

강성호 · 김현철 · 하선용*

한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지해양과학연구부
(21990) 인천광역시 연수구 송도미래로 26

Transmission of Solar Light according the Relative CDOM Concentration of
the Sea-ice-covered Pacific Arctic Ocean

Sung-Ho Kang, Hyun-Choel Kim, and Sun-Yong Ha*

Korea Polar Research Institute, Division of Polar Ocean Sciences
Incheon 21990, Korea

Abstract : The transmission of solar light according to the distribution of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) was measured in the Pacific Arctic Ocean. The Research Vessel Araon visited the ice-covered East Siberian and Chukchi Seas in August 2016. In the Arctic, solar [ultraviolet-A (UV-A), ultraviolet-B (UV-B), and photosynthetically active radiation (PAR)] radiation reaching the surface of the ocean is primarily protected by the distribution of sea ice. The transmission of solar light in the ocean is controlled by sea ice and dissolved organic matter, such as CDOM. The concentration of CDOM is the major factor controlling the penetration depth of UV radiation into the ocean. The relative CDOM concentration of surface sea water was higher in the East Siberian Sea than in the Chukchi Sea. Due to the distribution of CDOM, the penetration depth of solar light in the East Siberian Sea (UV-B, 9 ± 2 m; UV-A, 13 ± 2 m; PAR, 36 ± 4 m) was lower than in the Chukchi Sea (UV-B, 15 ± 3 m; UV-A, 22 ± 3 m; PAR, 49 ± 3 m). Accelerated global warming and the rapid decrease of sea ice in the Arctic have resulted in marine organisms being exposed to increased harmful UV radiation. With changes in sea ice covered areas and concentrations of dissolved organic matter in the Arctic Ocean, marine ecosystems that consist of a variety of species from primary producers to high-trophic-level organisms will be directly or indirectly affected by solar UV radiation.

Key words : Arctic, CDOM, Sea ice, UV radiation

1. 서 론

1987년 몬트리올 의정서 체결 이후 대기 중 오존 파괴 물질은 감소하였으며, 결과적으로 오존홀의 크기는 안정화 되었다. 최근 NASA의 발표에 의하면(2013년) 남극 오존홀의 크기는 2006년 연간 최대의 크기를 보인 후 평균

오존홀(1990년대 중반에 관찰된 평균 오존홀의 크기) 이하로 줄어들고 있다. 따라서, 현재의 예측으로는 2050년까지 오존 농도는 점진적 회복이 예상되고 있으나(Taalas et al. 2000), 기상 조건의 변화에 의해 매년 남극 대륙에서의 오존량은 변동성을 보임에 따라, 태양광 중 중파 자외선(Ultraviolet-B radiation; UV-B)에 의한 생태계 내 유해한 영향에 대해서는 지속적인 연구가 필요하다(Thomson et al. 2008).

*Corresponding author. E-mail : syha@kopri.re.kr

북반구 고위도 지역의 오존량 또한 성공적인 몬트리올 의정서의 이행으로 인하여 앞으로 수십년 간 증가할 것으로 예상하고 있으나(WMO 2011; Lean 2014), 기후 모델에 의한 예측 자료를 보면 21세기 말까지 북극 해빙이 급격하게 녹으면서 지역에 따라 표층 해수면 및 유광층에 이르는 깊이까지 중파 자외선(UV-B)에 의한 영향을 받을 수 있다고 경고하고 있다(Fountoulakis et al. 2014). 지난 수십 년 동안 기온 상승은 해빙에 덮혀 있던 해수면의 면적을 감소시킴으로서 해양 표층에 태양 자외선이 직접 노출되는 결과를 초래하고 있다(Häder et al. 2015). 북극의 평균 수온은 1951-1980년 동안 약 2°C 상승하였고(New et al. 2011), 과거 50년간 세계 평균 수온의 5배가 넘는 훨씬 빠른 속도로 수온이 오르고 있으며, 그 결과 2012년 여름 북극 해빙은 최저치를 기록함과 동시에, 2007년-2011년까지 평균 북극 해빙 분포에 비해 약 ~40%의 감소를 보였다(Zhang et al. 2013).

태양광은 일반적으로 장파 자외선(Ultraviolet-A radiation: UV-A) (315-400 nm), 중파 자외선(UV-B) (280-315 nm) 그리고 단파 자외선(Ultraviolet-C radiation: UV-C) (200-280 nm)로 나누어지며, 생물에 미치는 자외선의 영향은 자외선 파장대역에 따라 다르게 나타난다. 장파자외선(UV-A)은 광합성 과정 중 에너지 원이나 DNA 관련 수리 기작에 대한 에너지 원으로 사용될 수 있기 때문에 부정적인 영향(negative effect) 또는 긍정적인 반응(positive effect)을 일으킬 수 있다(Häder et al. 2007). 중파 자외선(UV-B)은 해양 생물 군집 다양성(diversity), 풍부도(richness), 기능(function), 그리고 구조(structure)를 변화시킬 수 있으며, 수생 및 육상 생태계 모두에서 전반적인 생태 과정에 영향을 준다(Karentz 2001; Dahms et al. 2011). 또한 중파 자외선(UV-B)은 해양 식물플랑크톤의 광합성 및 일차생산력 감소(Helbling et al. 1992; Häder et al. 2007), 영양염 흡수 및 DNA에도 부정적 영향을 준다(Karentz et al. 1991; Behrenfeld et al. 1995; Boelen et al. 2000). 그러므로 수층에 투과된 중파 자외선(UV-B) 조사량과 해빙의 손실로 인한 환경변화는 생지화학적 순환(Zepp et al. 2003) 뿐 아니라 육상(Ballare et al. 2011; Corell 2013) 및 수생(Häder et al. 2007, 2011) 생태계에 영향을 초래하게 된다.

용존 유기 화합물을 포함하여 해수내의 다양한 화학 성분의 조성도와 농도의 차이는 태양 자외선의 수층 투과 깊이에 영향을 미친다(Häder et al. 2007). 특히 자외선 또는 가시광선(visible light)을 흡수할 수 있는 유색 용존 유기물질(Chromophoric Dissolved Organic Matter; CDOM)은 태양광의 투과 깊이에 영향을 미친다(Nelson and Siegel 2002). 육상 기원 유색 용존 유기물질(CDOM)은 고등식물이 분해된 유기산 폴리머(organic acid polymers)로부터

휴믹산과 펙빅산과 같은 난분해성 물질(refractory organic matter)로 이루어졌다(Harvey and Boran 1985; Carder et al. 1989; Opsahl and Benner 1998). 그러나 육상 기원 유색 용존 유기물질(CDOM)은 대양의 전체 유색 용존 유기물질(CDOM)의 5% 미만으로(Opsahl and Benner 1998), 유색 용존 유기물질(CDOM) pool를 이루는 성분으로는 식물플랑크톤이나 박테리아에 의해서 쉽게 사용되어 낮은 농도로 존재하는 아미노산(amino acids), 펩타이드(peptides), 핵산(nucleic acids), 요소(urea) 및 저분자 물질들이다(Nelson and Siegel 2002). 또한 식물플랑크톤에 의해서 만들어진 자외선 흡수 물질(mycosporine-like amino acids; MAAs)이 직접적으로 수층으로 분비되어 유색 용존 유기물질(CDOM) pool의 상당 부분을 차지하기도 한다(Vernet and Whitehead 1996; Whitehead and Vernet 2000).

따라서, 본 연구의 목적은 태평양 북극 결빙해역 척치해 및 동시베리아해의 용존 유기물질(CDOM)의 상대적인 농도 분포를 살펴 본 후, 유색 용존 유기물질(CDOM)의 광차단 효과에 따른 태양광(장파, 중파 자외선 및 광합성 유효광) 투과량의 변화를 살펴보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

연구지역

본 연구는 2016년 8월 3일부터 19일까지 태평양 북극 결빙 해역인 척치해 및 동시베리아해를 국내 유일한 쇄빙 연구선 아라온호를 이용하여 시료를 얻었다. 총 11개 정점에서 중파 및 장파 자외선, 광합성 유효광선의 투과 깊이(표층 상대광량 1% 도달 수심)를 측정하였으며, 각 정점에서의 해빙 분포는 위성 관측을 통해 나타내었다(Fig. 1, Table 1). 태양광 투과에 영향을 미치는 유색 용존 유기물질(CDOM)의 상대적인 농도는 표층에서 증점적으로 측정하였다. 연구 정점 간 지역적차이를 보기 위해서 동시베리아해(정점 18, 20, 21), 척치해(정점 14, 29, 30), 이 두 지역의 중간부분(중앙 척치해; 정점 15, 16, 23, 24, 28)으로 총 세 개 해역으로 나누었다(Fig. 1). 연구 정점의 수온, 염분 자료는 아라온호에 장착되어 있는 Sea-Bird 911 plus system CTD(Sea-Bird, Inc., NY, USA)를 이용하여 획득하였으며, CTD/Rosette 시스템을 이용하여 수심별 해수를 채수하였다.

태양광선 투과량 및 상대적인 CDOM 농도, Chl a 농도 측정

수층 내 투과되는 태양광(장파, 중파 자외선 및 광합성 유효광)은 각 연구정점에서 RMSES radiometer(TriOS GmbH, Germany)를 이용하여 측정하였다. 표층부터 수심 40 m에서 50 m까지 중파 자외선(UV-B; 280-320 nm), 장

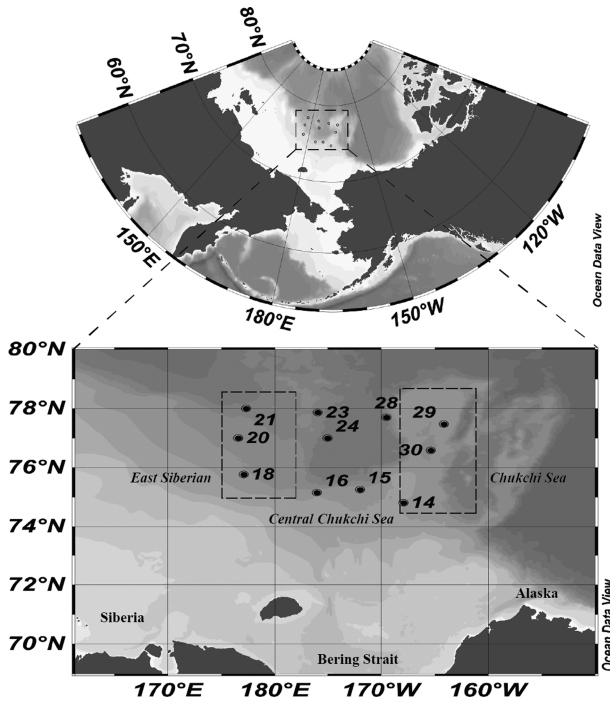


Fig. 1. Stations of sea ice-covered East Siberian Sea, Central Chukchi Sea and Chukchi Sea on August

과 자외선(UV-A; 320–360 nm), 그리고 광합성 유효광(PAR; 400–700 nm)의 세기($W m^{-2}$)를 측정하였으며, 상대광량 1%되는 수심을 구하였다.

유색 용존 유기물(CDOM)의 상대적인 농도는 CTD/Rosette 시스템을 이용하여 광합성 유효광의 상대 광량(100%, 50%, 10%, 1%)에서 채수한 후, 50 ml 주사기와 주사기 필터(Advantec; cellulose acetate, 0.2 μm)를 이용

하여 최대한 천천히 여과된 해수를 미리 태운(450°C, 4 h) 갈색병에 보관하였다. 광합성 유효광의 상대 광량에 따라 정점별 채수한 깊이는 각각 다르게 채수 하였다. 이후 상온과 온도 평형을 이룬 후 10 cm 석영셀에 넣고 UV spectrometer(Cary100, Agilent Technologies)를 이용하여 250–800 nm(spectrum resolution was 1 nm) 파장에서 얻은 값에 350 nm의 흡광도값을 사용하여 유색 용존 유기물(CDOM)의 상대적인 농도값(m^{-1})으로 표현하였다.

흡광계수($a(\lambda)$, m^{-1})는 아래의 식으로 계산하였다(Pugach et al. 2018).

$$a(\lambda) = \frac{2.303A(\lambda)}{L}$$

$A(\lambda)$ 는 파장 λ 에서의 광학 밀도이고, L 는 분광광도계 셀의 길이를 나타낸다. 350 nm의 흡광도값을 용존 유기탄소(DOC)와의 상관 관계 때문에 CDOM 농도로 정량하였다(Spencer et al. 2009; Stedmon et al. 2011; Walker et al. 2013; Gonçalves-Araujo et al. 2015; Mann et al. 2016).

해빙 밀도(sea ice concentration)는 미국 National Snow and Ice Data Center(NSIDC)에서 제공하는 공간해상도 25 km의 일간(daily) 해빙 밀도 데이터(Cavaliere et al. 1996)를 활용하여 각 지점 및 날짜별 정보를 획득하였다.

식물플랑크톤 생체량을 나타내는 엽록소 a (Chl a)의 농도는 각 정점 표층에서 해수를 채수한 후 47 mm GF/F Whatman 여과지를 통하여 여과한 후 분석 전까지 -80°C 냉동고에 보관 후 측정하였다. 각 여과지는 90% 아세톤으로 추출하였으며, 형광광도계(model Trilogy, Turner Designs, USA; method: Parson et al. 1984)을 통하여 농도를 측정하였다.

Table 1. Data of relative concentration of CDOM and penetration depth (Z:1%) of solar lights (UV-A, UV-B, and PAR) on the Chukchi Sea and East Siberian

	Station	Latitude	Longitude	dd/mm/year	Depth (m)	Sea ice concentration (%)	Secchi depth (m)	Chl a concentration ($\mu g/L$)	CDOM (m^{-1})	UVB-z (m)	UVA-z (m)	PAR-z (m)
East Siberian	St. 18	75° 46.014'N	177° 4.109'E	11/08/2016	485	57	15	0.14	0.017	6.8	12.7	40.8
	St. 20	76° 0.000'N	173° 36.000'E	12/08/2016	1223	65	9	0.40	0.022	6.8	11.2	32.5
	St. 21	78° 0.399'N	177° 18.486'E	12/08/2016	1693	46	8	0.33	0.013	12	15	34
Central Chukchi Sea	St. 15	75° 14.664'N	171° 58.896'W	16/08/2016	512	24	27	0.13	0.011	13.9	33.4	55
	St. 16	75° 8.759'N	176° 1.843'W	10/08/2016	325	23	18	0.07	0.011	10.7	16.7	48.6
	St. 23	77° 51.986'N	175° 54.522'W	15/08/2016	1564	38	15	0.06	0.014	7	15	34
	St. 24	76° 59.735'N	174° 59.820'W	16/08/2016	2008	22	22	0.04	0.011	13	21	45
	St. 28	77° 41.999'N	169° 30.015'W	18/08/2016	1750	20	28	0.06	0.006	12.9	21	55
Chukchi Sea	St. 14	74° 47.912'N	167° 48.589'W	09/08/2016	223	65	21	0.09	0.007	11.8	17.4	53.3
	St. 29	77° 27.011'N	164° 9.313'W	18/08/2016	275	32	34	0.05	0.009	18	24.8	50
	St. 30	76° 34.683'N	165° 22.158'W	19/08/2016	987	24	23	0.03	0.009	15	24.2	45

3. 결과 및 토의

북극 태양 자외선 방사량은 성층권의 오존량, 표면의 반사도, 그리고 구름량에 의해 주로 조절된다(Fountoulakis et al. 2014). 그 중 해양 생태계에 투과되는 자외선 투과량은 주로 용존 유기 화합물 특히 유색 용존 유기물(CDOM) 및 해빙의 존재 및 두께, 형태에 의해서 영향을 받는다. 해빙의 덮개(cover)와 해빙 두께의 감소는 자외선 조사량이 상당 부분 물속으로 투과할 수 있게 하고 해빙의 형성과 소멸의 시기 변화는 표면 반사율의 계절적 변화로 이어져서 결과적으로 이들 지역의 장파 및 중파 자외선 복사열의 변화를 초래하게 된다(Fountoulakis et al. 2014). 기존 연구들에서 북극 태양 자외선 조사량 및 미래 예측 뿐 아니라 자외선 영역에서 북극 해빙의 투과율에 대해 논의가 되었지만(Perovich et al. 1998; Winther et al. 2004; Perovich 2006; Zhao and Li 2010; Frey et al. 2011; Lei et al. 2012) 해빙 및 그 특성의 향후 변화에 따른 해양으로의 자외선 투과량의 변화에 대한 광범위한 연구는 부족한 실정이다(Stroeve et al. 2012; Notz et al. 2013).

동시베리아와 척치해의 해빙 분포는 연구 기간 동안 평균적으로 해빙이 40-56%(위성 관측) 정도 분포하고 있는 것으로 관측되었다(Table 1). 특히 동시베리아해에서 상대적으로 많은 해빙분포를 보이고 있는 반면, 척치해 및 중앙 척치해에서는 상대적으로 낮은 해빙의 분포를 보였다. 해빙의 분포는 유해 태양광량 일차적으로 차단하는 효과가 있다. 따라서 지속적인 해빙의 감소는 표층 해양 생태

계에 직접적인 영향을 미치게 되기 때문에 해빙의 분포 및 해빙으로부터 기원된 유색 용존 유기물의 공급 또한 태양광 투과량에도 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

북극 척치해의 다년생 해빙에서 해빙의 두께에 따라 측정된 자외선 투과량과 해빙 내 투과된 태양광(광합성 유효광)과 해상(open sea)에서의 투과 깊이를 비교한 결과, 중파 자외선의 경우 해빙의 상부에서 대부분 흡수되고, 태양광(광합성유효광) 역시 해빙에서 대부분 흡수되었다(Fig. 2a). 투과 깊이가 가장 깊은 광합성 유효광 대역에서도 해빙의 의한 광흡수율이 상당히 높은 것을 볼 때 해빙에 의해서 일차적으로 태양광을 차단하는 효과를 확인할 수 있었다(Fig. 2b). 따라서, 북극 해빙은 자외선 스트레스로부터 표층 해양 생태계를 일차적으로 보호하고 있는 것을 볼 수 있으며, 다년생 해빙으로 덮여 있던 해역이 기후변화를 통하여 해빙의 두께가 얇아짐에 따라 증가된 투과광량에 의해서 새로운 위해 환경에 노출될 수 있음을 보여준다.

결빙 해역의 축소와 해빙 두께가 얇아지는 변화는 평균적으로 더 많은 양의 자외선이 해양으로 투과될 수 있다(Fountoulakis et al. 2014). 북극 해빙 내로 투과되는 자외선 조사량은 해빙 내 공기 방울(air), 냉각고염수(brine), 염분 알갱이(solid salts), 용존 또는 입자성 미세조류 및 박테리아와 그 위에 덮여있는 눈에 의해서 결정되지만(Aas et al. 2002), 표층 및 해빙 밑에 서식하는 식물플랑크톤 군집에 의해서도 투과율 감소에 영향을 준다. 또한, 해빙의 종류와 표면의 상태에 따라 자외선 및 태양광 투과량은 상당한 차이를 보인다(Light et al. 2008; Nicolaus et al. 2013).

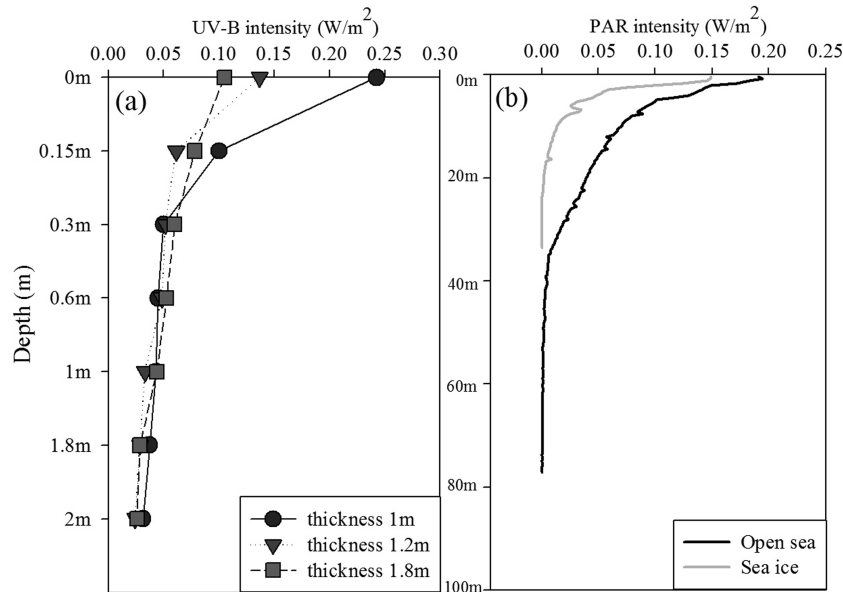


Fig. 2. UV-B irradiation transmission on the sea ice (a) and compared the transmission of PAR irradiation between sea ice and open sea on the Chukchi sea (b) in Pacific Arctic Ocean

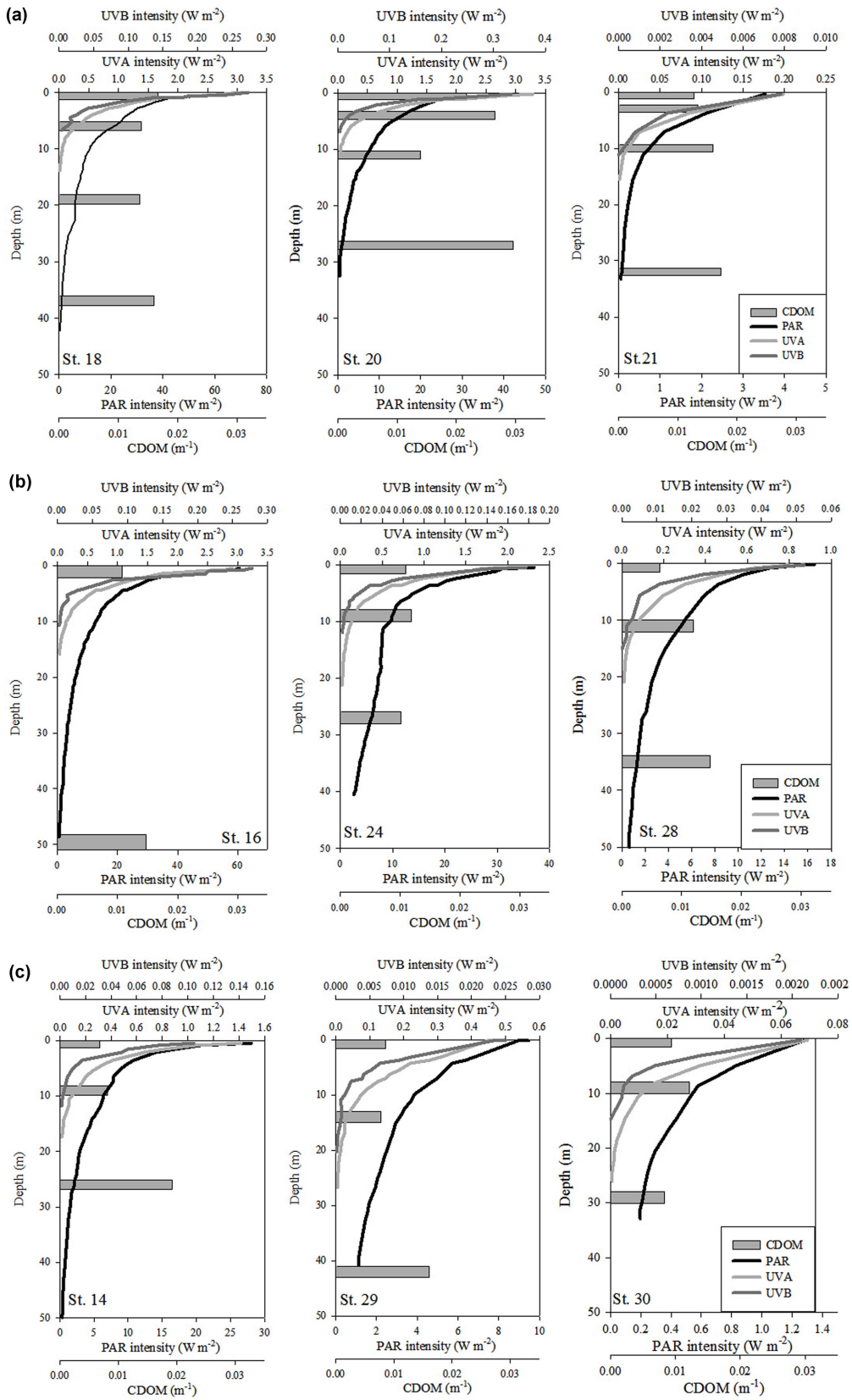


Fig. 3. Relative CDOM concentration at surface seawater (bar) and penetration depth of UV-B (dark gray line), UV-A (gray line), and PAR (black line) in the (a) East Siberian, (b) Central Chukchi Sea and (c) Chukchi Sea

CDOM 농도 분포에 따른 자외선 투과 깊이 비교

동시베리아해 및 척치해, 그리고 두 해역으로 중간 교차 해역인 중앙 척치해의 유색 용존 유기물(CDOM) 농도에 따른 태양광의 투과 깊이의 차이는 뚜렷하게 나타났다 (Table 1; Fig. 3). 동시베리아해의 경우, 다른 해역에 비해 상대적으로 높은 표층 유색 용존 유기물(CDOM)의 농도 (평균 $0.017 \pm 0.004 \text{ m}^{-1}$)와 낮은 태양광의 투과 깊이(중과 자외선: 평균 $8.5 \pm 2.5 \text{ m}$; 장파 자외선: $13 \pm 1.6 \text{ m}^{-1}$; 광합성 유효광: $35.8 \pm 3.6 \text{ m}$)를 보인 반면, 척치해의 경우, 유색 용존 유기물(CDOM)의 평균 농도는 0.008 m^{-1} ($\pm 0.001 \text{ m}^{-1}$)로 가장 낮았고 태양광 투과 깊이(중과 자외선: 평균 $14.9 \pm 2.5 \text{ m}$; 장파 자외선: $22.1 \pm 3.4 \text{ m}$; 광합성 유효광: $49.4 \pm 3.4 \text{ m}$)는 깊었다(Table 1). 동시베리아해와 척치해의 중간 연구 정점들(중앙 척치해)의 평균 유색 용존 유기물(CDOM)의 농도($0.011 \pm 0.002 \text{ m}^{-1}$)와 태양광 투과 깊이(중과 자외선: 평균 $11.5 \pm 2.5 \text{ m}$; 장파 자외선: $22.4 \pm 6.4 \text{ m}$; 광합성 유효광: $47.5 \pm 7.6 \text{ m}$)는 두 해역의 중간 값을 보임에 따라 표층 유색 용존 유기물(CDOM)의 상대적인 농도 분포는 태양광 투과 깊이에 영향을 주었음을 알 수 있었다.

2016년 척치해 해양환경 및 해빙 연구에서 유색 용존 유기물(CDOM) 농도 분포와 태양 자외선(UV-B) 및 광합성 유효광(PAR)의 투과량을 비교한 결과에서도 유색 용존 유기물(CDOM) 농도에 따른 자외선 투과율의 변화 역시 잘 보여준다(Table 1). 유색 용존 유기물의 기원은 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 현장의 생물적인 산물(autochthonous) (Carlson et al. 2002) 또는 북극해로 유입되는 육상 기원 유기물의 공급(allochthonous)으로 나눌 수 있다(Stedmon et al. 2011). 표층 해수에 높은 유색 용존 유기물(CDOM) 농도 분포를 보이고 있는 동시베리아해는 육상기원 유색 용존 유기물(CDOM) 및 상대적으로 높은 식물 플랑크톤 생물량에 의해, 중과 자외선의 경우 그 투과 깊이가 상당히 낮은 것을 볼 수 있다. 상대적으로 유색 용존 유기물(CDOM)의 농도가 낮은 북극 척치해는 육상 기원의 유기물의 공급이 상대적으로 적고, 해양 기원 유색 용존 유기물(CDOM)의 영향이 많은 해역으로 중과 자외선 및 광합성 유효광 대역의 태양광의 투과 깊이가 훨씬 높은 것을 볼 수가 있다(Table 1). 이런 결과들을 종합해 볼 때, 중과 및 장파 자외선, 광합성 유효광의 투과 깊이는 식물플랑크톤 군집 및 생물량, 탄소 흡수율에도 영향을 미칠 것으로 보인다.

4. 고찰

1980년대 남극 대륙의 '오존홀' 발견 이후, 국제 사회는 몬트리올 협정서를 통하여 오존층 파괴 물질(ozone-

depleting substances; ODS)의 사용을 규제한 결과 chlorofluorocarbons과 오존 파괴 물질(ODS)의 사용이 극적으로 줄어들었다. 이러한 노력으로 성층권의 오존층 파괴와 지표면으로 도달하는 중과자외선 방사량이 성공적으로 줄어들고 있으나 많은 오존파괴 물질들은 상당히 긴 잔류 시간(life time)를 가지고 있기 때문에 성층권 내 오존층 파괴는 여전히 일어나는 중이며, 앞으로 수십년에 걸쳐 계속 진행될 예정이다(WMO 2011). 북극의 경우, 2011년에 최저치의 오존층 농도가 관측 바 있고(Manne et al. 2011), 현재 오존층 파괴와 회복 사이에서 태양 중과 자외선의 생태계에 미치는 영향 또한 기후변화의 긍정적(positive) 또는 부정적(negative) 피드백에 따라 상당한 변동성을 보일 것으로 예상된다.

게다가 지구 온난화의 가속화로 인한 북극 해빙분포의 급격한 감소는 결과적으로 유해 중과 자외선으로부터 보호 받았던 해역까지 새로운 위해 환경에 노출됨으로써 북극 해양 생태계는 일차생산자부터 상위 포식자까지 전체적인 영향을 직·간접적으로 받을 것으로 예상된다. 본 연구 결과는 북극해 결빙해역 해빙의 분포와 유색 용존 유기물의 분포에 따라 투과되는 태양광의 차이를 뚜렷하게 보이고 있다. 따라서 북극 해빙의 변동성과 유색 용존 유기물의 순환은 해양 생태계의 변화와 상당히 밀접한 관계를 가지고 있으며, 장기적인 추적 관측이 필요하다고 판단된다.

사사

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 "북극해 환경 변화 통합관측 및 활용 연구(20160245)" 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Aas EJ, Høkedal J, Høgerslev NK, Sandvik R, Sakshaug E (2002) Spectral properties and UV-Attenuation in Arctic Marine waters. In: Hessen D (ed) UV Radiation and Arctic ecosystems. Springer, Berlin, pp 23–56
- Ballare CL, Caldwell MM, Flint SD, Robinson SA, Bornman JF (2011) Effects of solar ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems. Patterns, mechanisms, and interactions with climate change. *Photoch Photobio Sci* 10(2):226–241
- Behrenfeld MJ, Lean DRS, Lee HII (1995) Ultraviolet-B radiation effects on inorganic nitrogen uptake by natural assemblages of oceanic plankton. *J Phycol* 31(1):25–36
- Boelen P, De Boer MK, Kraay GW, Veldhuis MJW, Buma AGJ (2000) UVBR-induced DNA damage in natural

- marine picoplankton assemblages in the tropical Atlantic Ocean. *Mar Ecol-Prog Ser* **193**:1–9
- Carder KL, Steward RG, Harvey GR, Ortner PB (1989) Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnol Oceanogr* **34**:68–81
- Carlson CA (2002) Production and removal processes. In: Hansell DA, Carlson CA (eds) *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter*. Elsevier, San Diego, pp 91–151
- Cavaliere D, Parkinson C, Gloersen P, Zwally HJ (1996) Sea ice concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS passive microwave data, Version 1. <https://nsidc.org/data/NSIDC-0051/versions/1#> Accessed 5 Jun 2018
- Corell R (2013) Arctic impact assessment: setting the stage. In: Berkman PA, Vylegzhanin AN (eds) *Environmental security in Arctic Ocean*. Springer, Berlin, pp 59–72
- Dahms HU, Dobretsov S, Lee JS (2011) Effects of UV radiation on marine ectotherms in polar regions. *Comp Biochem Phys C* **153**(4):363–371
- Fountoulakis I, Bais AF, Tourpali K, Kragkos K, Misios S (2014) Projected changes in solar UV radiation in the Arctic and sub-Arctic Oceans: effects from changes in reflectivity, ice transmittance, clouds, and ozone. *J Geophys Res-Atmos* **119**:8073–8090
- Frey KE, Perovich DK, Light B (2011) The spatial distribution of solar radiation under a melting Arctic sea ice cover. *Geophys Res Lett* **38**:L22501. doi:10.1029/2011GL049421
- Gonçalves-Araújo R, Stedmon R, Heim B, Dubinenkov I, Kraberg A, Moiseev D, Bracher A (2015) From fresh to marine water: characterization and fate of dissolved organic matter in the Lena River delta region, Siberia. *Front Mar Sci* **2**:108. doi:10.3389/fmars.2015.00108
- Häder D-P, Helbling EW, Williamson CE, Worrest RC (2011) Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochem Photobiol Sci* **10**:242–260
- Häder D-P, Kumar HD, Smith RC, Worrest RC (2007) Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochem Photobiol Sci* **6**:267–285
- Häder D-P, Williamson CE, Wangberg SA, Rautio M, Cose KC, Gao K, Helbling EW, Sinha RP, Worrest R (2015) Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors. *Photochem Photobiol Sci* **14**:108–126
- Harvey GR, Boran DA (1985) Geochemistry of humic substances in seawater. In: Aiken GR, KcKnight D, Wershaw RL, MacCarthy P (eds) *Humic substances in soil, sediment, and water: geochemistry, isolation and characterization*. Wiley-Interscience, New York, pp 233–247
- Helbling EW, Villafane V, Ferrario M, Holm-Hansen O (1992) Impact of natural ultraviolet radiation on rates of photosynthesis and on specific marine phytoplankton species. *Mar Ecol-Prog Ser* **80**:89–100
- Karentz D (2001) The Effects of UV radiation in the marine environment. *Eos T AM Geophys UN* **82**:477–479
- Karentz D, Cleaver JE, Mitchell DL (1991) Cell survival characteristics and molecular responses of Antarctic phytoplankton to ultraviolet-B radiation. *J Phycol* **27**(3):326–341
- Lean JL (2014) Evolution of total atmospheric ozone from 1900 to 2100 estimated with statistical models. *J Atmos Sci* **71**:1956–1987
- Lei R, Zhang Z, Matero I, Cheng B, Li Q, Huang W (2012) Reflection and transmission of irradiance by snow and sea ice in the central Arctic Ocean in summer 2010. *Polar Res* **31**:17325. doi:10.3402/polar.v31i0.17325
- Light B, Grenfell TC, Perovich DK (2008) Transmission and absorption of solar radiation by Arctic sea ice during the melt season. *J Geophys Res* **113**:C03023. doi:10.1029/2006JC003977
- Mann PJ, Spencer RGM, Hernes PJ, Six J, Aiken GR, Tank SE, McClelland JW, Butler KD, Dyda RY, Holmes RM (2016) Pan-Arctic trends in terrestrial dissolved organic matter from optical measurements. *Front Earth Sci* **4**:25. doi.org/10.3389/feart.2016.00025
- Manney GL, Santee ML, Rex M, Livesey NJ, Pitts MC, Veefkind P, Nash ER, Wohltmann I, Lehmann R, Froidevaux L, Poole LR, Schoeberl MR, Haffner DP, Davies J, Dorokhov V, Gernandt H, Johnson B, Kivi R, Kyrö E, Larsen N, Levelt PF, Makshtas A, McElroy T, Nakajima H, Parrondo MC (2011) Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature* **478**:469–475
- Nelson NB, Siegel DA (2002). Chromophoric DOM in the open ocean. In: Hansell DA, Carlson CA (eds) *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter*. Elsevier, San Diego, pp 547–578
- New M, Liverman D, Schroder H, Anderson K (2011) Four degrees and beyond: the potential for a global temperature increase of four degrees and its implications. *Philos T R Soc A* **369**:6–19
- Nicolaus M, Petrich C, Hudson SR, Granskog M (2013) Variability of light transmission through Arctic land-fast sea ice during spring. *Cryosphere* **7**:977–986
- Notz D, Haumann FA, Haak H, Jungclaus JH, Marotzke J

- (2013) Arctic sea-ice evolution as modeled by Max Planck Institute for Meteorology's Earth system model. *J Adv Mode Earth Syst* **5**(2):172–194
- Opsahl S, Benner R (1998) Photochemical reactivity of dissolved lignin in river and ocean waters. *Limnol Oceanogr* **43**:1297–1304
- Parsons TR, Maita Y, Lalli CM (1984) A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford, 173 p
- Perovich DK (2006) The interaction of ultraviolet light with Arctic sea ice during SHEBA. *Ann Glaciol* **44**:47–52. doi:10.3189/172756406781811330
- Perovich DK, Roesler CS, Pegau WS (1998) Variability in Arctic sea ice optical properties. *J Geophys Res* **103**(C1): 1193–1208
- Pugach SP, Pipko II, Shakhova NE, Shirshin EA, Perminova IV, Gustafsson Ö, Bondur VG, Ruban AS, Semiletov IP (2018) Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011). *Ocean Sci* **14**:87–103
- Spencer RGM, Aiken GR, Butler KD, Dornblaser MM, Striegl RG, Hernes PJ (2009) Utilizing chromophoric dissolved organic matter measurements to derive export and reactivity of dissolved organic carbon exported to the Arctic Ocean: a case study of the Yukon River, Alaska. *Geophys Res Lett.* **36**:L06401. doi.org/10.1029/2008GL036831
- Stedmon CA, Amon RMW, Rinehart AJ, Walker SA (2011) The supply and characteristics of colored dissolved organic matter (CDOM) in the Arctic Ocean: Pan Arctic trends and differences. *Mar Chem* **124**:108–118
- Stroeve JC, Kattsov V, Barrett A, Serreze M, Pavlova T, Holland M, Meier WN (2012) Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. *Geophys Res Lett* **39**:L16502. doi:10.1029/2012GL052676
- Taalas P, Kaurola J, Kylling A, Shindell D, Sausen R, Dameris M, Grewe V, Herman J, Damski J, Steil B (2000) The impact of greenhouse gases and halogenated species on future solar UV radiation doses. *Geophys Res Lett* **27**:1127–1130
- Thomson PG, Davidson AT, Cadman N (2008) Temporal changes in effects of ambient UV radiation on natural communities of Antarctic marine protists. *Aquat Microb Ecol* **52**:131–147
- Vernet M, Whitehead K (1996) Release of ultraviolet-absorbing compounds by the red-tide dinoflagellate, *Lingulodinium polyedra*. *Mar Biol* **127**:35–44
- Walker SA, Amon RMW, Stedmon CA (2013) Variations in high-latitude riverine fluorescent dissolved organic matter: a comparison of large Arctic rivers. *J Geophys Res-Bioge* **118**:1689–1702
- Whitehead K, Vernet M (2000) Influence of mycosporine-like amino acids (MAAs) on UV absorption by particulate and dissolved organic matter in La Jolla Bay. *Limnol Oceanogr* **45**:1788–1796
- Winther J-G, Edvardsen K, Gerland S, Hamre B (2004) Surface reflectance of sea ice and under-ice irradiance in Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Res* **23**:115–118
- WMO (2011) Scientific assessment of ozone depletion: 2010. World Meteorological Organization, Geneva, Global Ozone Research and Monitoring Project Report 52, 231 p
- Zepp RG, Callaghan TV, Erickson III DJ (2003) Interactive effects of ozone depletion and climate change on biogeochemical cycles. *Photochem Photobio Sci* **2**:51–61
- Zhang J, Lindsay R, Schweiger A, Steele M (2013) The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice retreat. *Geophys Res Lett* **40**:720–726
- Zhao J, Li T (2010) Solar radiation penetrating through sea ice under very low solar altitude. *J Ocean Univ China* **9**(2):116–122

Received Sep. 18, 2018

Revised Nov. 22, 2018

Accepted Dec. 10, 2018