

남극해 유색 용존 유기물질의 장기 변동성 모니터링을 위한 세종 기지의 활용 가능성 평가

전미해* · 박미옥**† · 강성호*** · 전미사****

* 부경대학교 해양학과 석사과정, ** 부경대학교 해양학과 교수,
*** 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지해양과학연구부 책임연구원,
**** 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지해양과학연구부 박사과정

Evaluation of Sejong Base as a Long Term Monitoring Site for Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) Variation in the Antarctic Ocean

Mi-Hae Jeon* · Mi-Ok Park**† · Sung-Ho Kang*** · Misa Jeon****

* Master student, Pukyong National University, Department of Oceanography, Busan 48513, Korea

** Professor, Pukyong National University, Department of Oceanography, Busan 48513, Korea

*** Senior researcher, Korea Polar Research Institute, Division of Polar Ocean Sciences, Incheon 21990, Korea

**** Ph.D student, Korea Polar Research Institute, Division of Polar Ocean Sciences, Incheon 21990, Korea

요 약 : 유색 용존 유기물의 빛 흡수와 해빙의 가속화는 수생생태계와 열수지 역동성 간의 양적 피드백에 영향을 줄 수 있으므로 극지 해양에서 유색 용존 유기물의 장기 모니터링이 필요하게 되었다. 그러나 극지 환경에서의 관측은 용이하지 않은 접근성과 거친 기상으로 장기 모니터링이 쉽지 않다. 따라서 유색 용존 유기물의 장기 모니터링 장소로서 남극 세종 기지의 가능성을 확인하기 위해, 마리안 소만과 맥스웰 만에서 유색 용존 유기물의 분포와 외부로부터의 영향을 파악하기 위한 관측을 수행하였다. 맥스웰 만 내의 세종 부두와 세종 곶의 72시간 유색 용존 유기물의 변동성을 관측하고, 외부 영향이 없었던 세종 부두에서 2010년 2월에서 11월까지 10개월간 유색 용존 유기물의 연간 변화와 계절변동을 관측하였다. 세종 부두의 유색 용존 유기물 농도는 가을과 겨울 동안 가장 높고 봄과 여름에 감소하는 뚜렷한 계절 변동성을 보였고, 남극 인근 해역에서 측정된 유색 용존 유기물 농도 자료와 비교하였다. 따라서 우리는 남극해의 열수지에 대한 중요한 요인이자 광화학적 및 생물학적 환경변화에 관한 지시자인 유색 용존 유기물을 장기 모니터링을 위해 적합한 장소로 맥스웰 만의 세종 부두를 제안한다.

핵심용어 : 유색 용존 유기물, 장기 모니터링, 연변동성, 세종 기지, 남극해

Abstract : As the positive feedback between the absorption of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) and acceleration of ice melt can impact the aquatic biota and dynamic heat budget, long-term monitoring of the CDOM variation in the polar ocean is necessary. However, the monitoring of CDOM is not easy because of harsh weather and difficult access, especially in the Antarctic Ocean. Therefore, the purpose of this study was to find a suitable long-term monitoring site for CDOM variation; we selected Maxwell Bay and Marian Cove at Sejong Base and horizontal and vertical distributions of CDOM were measured. After a 72 hr time-series measurement test of the CDOM variation at Sejong Dock and Sejong Cape in Maxwell Bay, Sejong Dock was selected, as it does not have land discharge effects. The seasonal variation of CDOM was evident and the average CDOM concentration of Maxwell Bay was comparable with the adjacent sea. The CDOM at Sejong Dock from February to November 2010 was the highest in the fall and winter and the lowest during spring and summer. Thus, based on our one-year CDOM data, we suggest that Sejong Dock in Maxwell Bay is suitable for long-term monitoring of CDOM as an indicator of photochemical and biological environmental change and an important factor in determining the heating budget in the Antarctic Ocean.

Key Words : CDOM, Long-term monitoring, Annual variation, Sejong Base, Antarctic Ocean

* First Author : jmh7630@kopri.re.kr, 032-760-5813

† Corresponding Author : mopark@pknu.ac.kr, 051-629-6675

1. 서론

유색 용존 유기물질(Chromophoric Dissolved Organic Matter, CDOM)은 용존 유기물질 중 광학적으로 활성화된 물질로, 자외선 및 가시광선(UV-Visible) 영역의 빛을 흡수하는 것으로 알려져 있다(Barbini et al., 2003; Blough and Vecchio, 2002; Nelson and Siegel, 2002). 또한 CDOM은 용존 유기물질 중에서 중요한 탄소 저장고로 인식되고 있으며(Hansell, 2002; Mopper et al., 1991), 열 흡수를 통해 수온 증가와 용빙을 가속화하여 해수 중 유기탄소의 광분해를 유발하거나 미생물의 활동을 증가시켜 남빙양의 생지화학적 순환에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Hill, 2008; Pegau, 2002; Stedmon et al., 2011).

해수 중 CDOM의 공급은 육상기원과 자생기원으로 분류되며, 육상기원 CDOM은 담수에 의한 공급이 주요하고(Blough et al., 1993; Vodacek et al., 1997), 자생기원 CDOM은 박테리아 및 식물플랑크톤과 같은 생물학적 요인에 의해 공급되거나(Nelson and Siegal, 2002), 물리·화학적 과정에 의해 공급되는 것으로 알려져 있다. 하지만 북극해와 달리 남극해의 경우 주변 육지로부터의 담수 유입이 없기 때문에 육상기원 CDOM에 비해 자생기원 CDOM이 우세하게 나타난다. 과거 남극에서의 CDOM에 대한 연구에서 해빙이 CDOM의 잠재적 공급원임을 제시한 바 있으며(Kieber et al., 2009; Ortega-Retuerta et al., 2010), 남극해 아이스 코어 분석을 통해 해빙이 표층 CDOM의 공급원임을 확인하였다(Norman et al., 2011). 태양복사 또한 fatty acids 혹은 triglycerides를 휴믹계 물질로 전환시켜 CDOM 공급원으로서 역할을 하기도 하는데(Kieber et al., 1997), 이 과정은 photohumification이라 한다. 또한, 남극의 많은 해역에서 CDOM은 chlorophyll *a*와 강한 양의 상관관계를 나타내어 식물플랑크톤과 같은 생물학적 요인이 CDOM의 주요 공급원임을 확인하였다(Bricaud et al., 2010; Ortega-Retuerta et al., 2010). 아문젠 해역 폴리나에서 식물플랑크톤 중 diatom에 비해 Prymnesiophyte의 *Phaeocystis antarctica*에 의한 CDOM 생산의 기여도가 높은 것으로 나타났다(Lee et al., 2016). 이처럼 남극은 식물플랑크톤과 같은 생물학적 요인과 용빙과 같은 물리학적 요인에 의해 CDOM이 주로 공급되는 것으로 알려져 있다.

주요 CDOM 제거원으로는 표층에서의 광화학적 과정을 들 수 있다. 태양복사는 CDOM 공급원뿐만 아니라 CDOM 제거원으로도 알려져 있다. 이미 많은 연구를 통해 광분해 과정이 CDOM의 주요 제거원이며(Nelson and Siegal, 2002; Siegl and Michaels, 1996), 혼합층에 비해 표층에서 CDOM 농도가 낮게 나타난다는 것을 확인한 바 있다(Hill, 2008; Twardowski and Donaghay, 2001).

최근 전 지구적 기후변동에 의해 극지 해빙 농도가 변화하는 등 극지의 해양 환경 변화는 더욱 빠르게 일어나고 있

다(The IMBIE team, 2018; Steig et al., 2009). 극지 해빙에는 높은 농도의 DOM이 포함되어 있기 때문에(Broggi et al., 2018; Meiners et al., 2009; Norman et al., 2011; Stedmon et al., 2011; Thomas et al., 2001; Underwood et al., 2010), 해빙의 용해가 가속화된다면 CDOM을 포함하는 많은 DOM이 해수 중으로 공급될 가능성이 있다. 또한 Lee et al.(2016)은 우점 식물플랑크톤 변화에 따라 CDOM 공급 정도 또한 변화할 수 있음을 제시하였다. 따라서 기후변화에 따라 생태계가 변화한다면 CDOM 농도 및 분포 또한 영향을 받을 것으로 예측되며, 이는 다시 해양 환경의 변화를 초래할 수 있기 때문에 CDOM의 변동성을 지속적으로 모니터링 해야 할 필요가 있다. 하지만 극지 해역은 지리적 특성상 접근이 어려운 탓에 지속적인 모니터링이 어려운 환경이다. 그러나 만약 1년 내내 연구원들이 상주하는 남극 킹조지 섬(King George Island)의 세종 기지를 활용한다면 장기 모니터링을 위한 어려움을 해소할 수 있을 것으로 예상된다. 만약 세종 기지로부터 인위적인 유입이 없고, 세종 기지에서 측정된 CDOM의 농도와 변동성이 남극 CDOM을 대표할 수 있다면 세종 기지는 남극 CDOM 변동성을 파악하기 위한 모니터링 사이트로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구를 통해 지속적인 CDOM 모니터링 사이트로서 세종 기지를 활용할 수 있는지 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 해역

세종 기지는 킹조지 섬의 바톤 반도 끝에 위치하며(62°13'S 58°47'W) 이는 아남극대에 해당된다. 세종 기지의 북쪽과 서쪽은 각각 Marian Cove와 Maxwell Bay와 접해있다. 조사 정점은 Marian Cove에서 5개 정점(H8, H11, H14, H17, H19)과 Maxwell Bay에서 4개 정점(H1, H2, H3, H5)에서 채수하였고, 장기 모니터링 정점을 찾기 위한 목적으로 SJ1(세종 부두)과 SJ2(세종 곳)에서 72시간 테스트를 실시한 후, SJ 1(세종 부두) 정점에서 CDOM 연변동을 관찰하기 위한 모니터링을 수행하였다. 채수 수심은 Maxwell Bay와 Marian Cove에서 각각 0, 5, 10, 20 m에서 채수하였고, 세종 부두와 세종 기지에서는 표층 해수만 채수하였다.

세종 기지에서 현장 조사는 목적에 따라 세 차례 수행하였다(Fig. 1). 2010년 1월 16일부터 2월 18일까지 Marian Cove와 Maxwell Bay에서 CDOM의 수평·수직적 농도를 측정하였으며, 2010년 1월 29일부터 2월 1일까지 CDOM의 육상으로부터의 유입 영향을 파악하기 위하여 4시간 간격으로 72시간 동안 CDOM 모니터링을 실시하였다. CDOM의 연간 변동을 보기 위한 목적으로 2010년 2월부터 11월까지 가능한 한 3일 간격으로 CDOM 농도를 측정하였다.

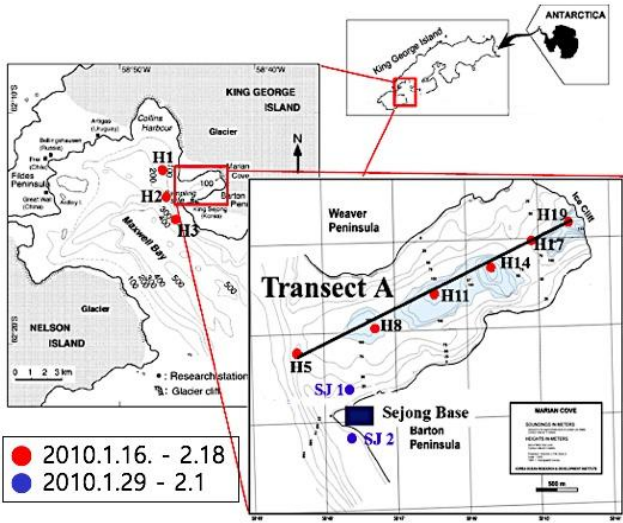


Fig. 1. A map of monitoring stations at Maxwell Bay and Marian Cove at the King George Island, Antarctica.

2.2 CDOM

Rosette sampler를 이용하여 해수 250 mL를 채수한 후, 자체 제작한 여과장치를 이용하여 여과를 실시하였다. CDOM 분석을 위한 해수는 여과지(nucleopore filter, 0.2 μm)를 이용해 미리 전기회화로에서 450°C에서 6시간 동안 유기물을 연소시킨 유리 시료병(Whatman, Clear narrow neck bottle)에 직접 받아 오염을 최소화하였다. 여과 해수는 분석 전까지 냉장 보관하였으며, 이후 분광광도계(Cary-100, Varian, USA)로 유색 용존 유기물의 흡광도를 측정하였다. Blank 시료는 NASA protocol에 따라 초순수를 이용해 3회 측정된 값의 평균값을 이용하였다(Mitchell et al., 2002). 측정된 흡광도에서 유기물 흡광이 거의 일어나지 않는 750 nm의 흡광도 값을 뺀 후, 아래 식을 이용하여 CDOM의 흡광계수(a_{cdom})를 구하였다(Blough and Green, 1995; Blough and Vecchio, 2002; Kahru and Mitchell, 2001).

$$a_{cdom}(\lambda) = 2.303A(\lambda)/r \quad (\text{Eq. 1})$$

위 식(1)의 $A(\lambda)$ 는 파장 λ 에 대한 용존 유기물의 흡광도 값이다. 2.303은 상용대수 함수인 흡광도 값을 자연대수 함수인 흡광계수로 변환해주기 위한 상수 값, r 은 측정 셀에 대한 path length로 m 단위를 이용한다. 이후로는 흡광도를 환산한 흡광계수를 $a_{cdom}(\lambda)$ 로 CDOM 농도로 지칭하도록 한다. 본 연구에서는 300 nm, 325 nm와 412 nm 파장의 흡광도를 흡광계수로 환산하여 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CDOM의 수평적 분포

CDOM의 수평적 분포를 살펴보기 위해 외양 쪽 Maxwell Bay와 빙벽 앞인 Marian Cove에서 파장대별 표층의 CDOM 흡광도를 Fig. 2에 나타내었다. 두 파장대의 수평분포 양상은 유사하였다. Maxwell Bay와 Marian Cove에서 $a_{cdom}(325)$ 평균은 각각 $0.22 \pm 0.04 \text{ m}^{-1}$, $0.19 \pm 0.01 \text{ m}^{-1}$ 로 Maxwell Bay에서 비교적 높게 나타났다. $a_{cdom}(412)$ 의 평균 또한 Maxwell Bay와 Marian Cove에서 각각 $0.08 \pm 0.03 \text{ m}^{-1}$, $0.06 \pm 0.01 \text{ m}^{-1}$ 로 Maxwell Bay에서 높게 나타났다. 남극 해빙이 CDOM의 잠재적인 공급원으로 제시된 바(Kieber et al., 2009; Ortega-Retuerta et al., 2010) 있어, 용빙에 의해 빙벽 앞의 정점인 Marian Cove 해수 중으로 높은 농도의 CDOM이 공급될 것이라는 예상과 달리, 빙벽 앞인 Marian Cove보다 외양 쪽 Maxwell Bay에서 상대적으로 높은 CDOM 농도를 보였다. 이는 해빙 감소에 따라 광분해가 증가한 결과이거나, 해빙에 의한 CDOM 공급보다 생물학적 요인이나 해류 등에 의한 CDOM 공급이 더 우세한 결과였을 것으로 판단된다.

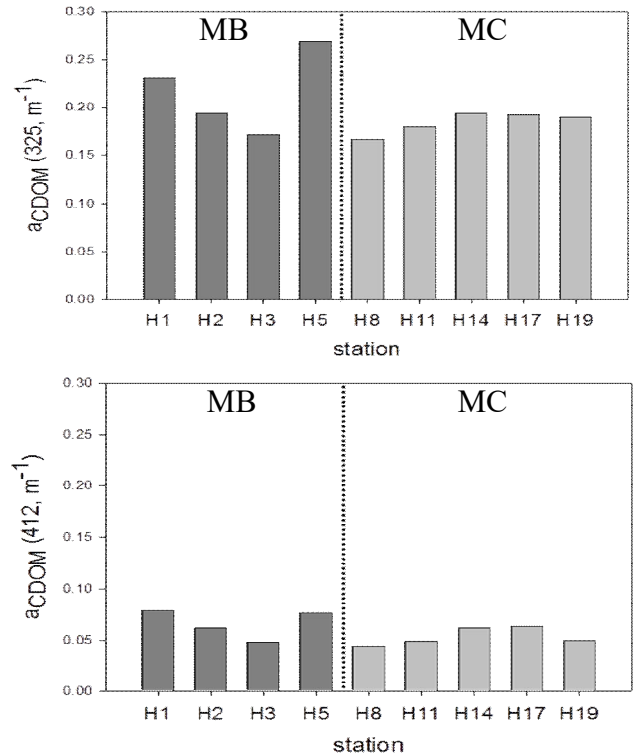


Fig. 2. Horizontal distributions of $a_{cdom}(325)$ and $a_{cdom}(412)$ in Maxwell Bay and Marian Cove in austral summer of 2010 (MB: Maxwell Bay, MC: Marian Cove).

3.2 CDOM의 수직적 분포

장기적인 CDOM 모니터링에 적합한 장소를 찾기 위해 Marian Cove와 Maxwell Bay에서 $a_{\text{cdom}}(300)$, $a_{\text{cdom}}(325)$ 와 $a_{\text{cdom}}(412)$ 의 수직 분포를 살펴보았다(Fig. 3). Maxwell Bay(H2)에서 $a_{\text{cdom}}(300)$ 은 표층에서부터 10 m까지는 거의 유사한 값을 보이다가 수심이 깊어지면서 약간 증가하는 양상을 보였다. 반면 $a_{\text{cdom}}(325)$ 와 $a_{\text{cdom}}(412)$ 는 아표층 5 m 수심에서 증가하는 양상을 보이고, 10 m 수심 이후부터는 유사한 농도를 유지하였다. Marian Cove 중앙에 위치한 H11에서는 $a_{\text{cdom}}(300)$, $a_{\text{cdom}}(325)$ 와 $a_{\text{cdom}}(412)$ 모두 표층에서 최댓값을 나타내고, 5 m 수심 이후 점차 감소하는 양상을 보였다. Marian Cove 안쪽 빙벽 앞의 H17에서 $a_{\text{cdom}}(300)$ 은 표층에서, $a_{\text{cdom}}(325)$ 와 $a_{\text{cdom}}(412)$ 는 5 m에서 아표층 최댓값을 보였으며, 최댓값이 나타난 이후 수심에서는 CDOM의 흡광도가 점차 감소하였다.

Maxwell Bay의 H2 정점의 경우, $a_{\text{cdom}}(300)$, $a_{\text{cdom}}(325)$ 와 $a_{\text{cdom}}(412)$ 의 수직농도의 변화가 크지 않고 유사하게 나타났다. 반면 Marian Cove 내의 H11 정점과 H17 정점의 경우, $a_{\text{cdom}}(300)$ 은 0.5 m^{-1} 이상의 표층 최댓값을 보인 후 5 m 이심에서 급격한 감소하여 $a_{\text{cdom}}(325)$, $a_{\text{cdom}}(412)$ 와 다른 수직분포를 보였다. 이는 Marian Cove와 Maxwell Bay에서 수평분포가 수직분포와 다른 것을 보여주었다. 이는 CDOM의 파장별 공급 혹은 분해의 정도가 다른 것으로 유추되며, 특히 만내의 빙붕 용해에 의한 저분자량 유색 용존유기물의 공급과 표층 성층화에 의한 $a_{\text{cdom}}(325)$, $a_{\text{cdom}}(412)$ 의 표층 광분해의 진행에 의한 결과로 판단된다(Fig. 3).

즉, Marian Cove에서는 20 m 내에서 CDOM의 농도가 성층화 되어있는 반면, Maxwell Bay에서는 20 m 내에서 CDOM의 농도가 큰 변화 없이 잘 혼합되어 있음을 확인하였다. Marian Cove처럼 표층 공급원이 있는 경우와 달리 수직 혼합이 비교적 활발한 Maxwell Bay에서 특정 공급원으로부터의 유입 없이 주변 해역의 평균적인 CDOM 농도를 대표할 수 있다고 보고, 장기적인 CDOM 농도의 변동성을 관찰하는데 적합한 정점임을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 혼합이 활발하고 모든 파장에서 a_{cdom} 이 유사한 패턴을 보이는 Maxwell Bay에 위치한 세종 부두와 세종 곳을 선정하여 72시간 모니터링 사이트로 선택하여 CDOM 농도를 측정하였다.

3.3 CDOM의 72시간 모니터링

세종 부두(SJ 1)과 세종 곳(SJ 2)에서 시간에 따른 CDOM 변동 양상을 파악하기 위해(Fig. 1), 2010년 1월 30일 오후 7시부터 4시간 간격으로 72시간 동안 CDOM 농도 변화를 모니터링 하였다(Fig. 4). 세종 부두와 세종 곳에서 $a_{\text{cdom}}(300)$ 의 평균은 각각 $0.42 \pm 0.11 \text{ m}^{-1}$, $0.72 \pm 0.44 \text{ m}^{-1}$ 로 나타났으며, 최댓값은 각각 0.72 m^{-1} , 2.38 m^{-1} 로 나타났다. 세종 부두와 세종 곳

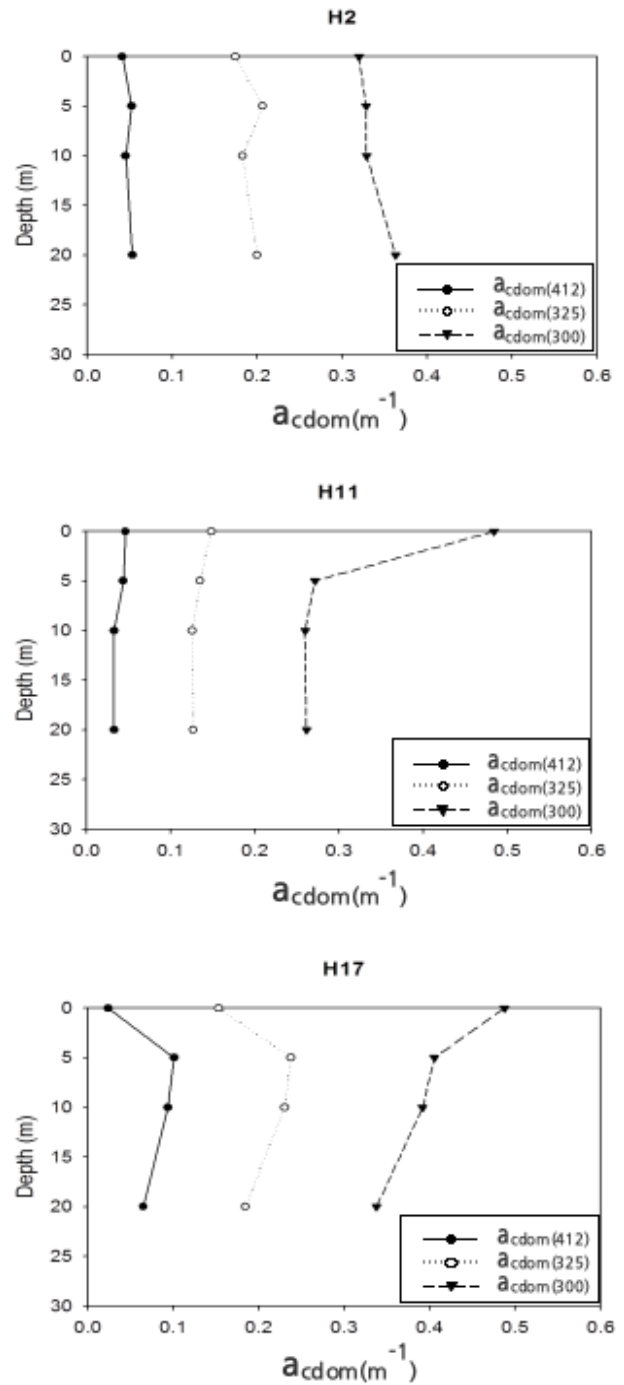


Fig. 3. Vertical distributions of $a_{\text{cdom}}(300)$, $a_{\text{cdom}}(325)$ and $a_{\text{cdom}}(412)$ in Marian Cove and Maxwell Bay in austral summer of 2010.

에서 $a_{\text{cdom}}(325)$ 의 평균은 $0.29 \pm 0.18 \text{ m}^{-1}$, $0.41 \pm 0.15 \text{ m}^{-1}$ 이며, 최댓값은 각각 0.91 m^{-1} , 0.72 m^{-1} 로 나타났다. $a_{\text{cdom}}(412)$ 의 평균은 각각 $0.08 \pm 0.03 \text{ m}^{-1}$, $0.11 \pm 0.04 \text{ m}^{-1}$ 로 나타났으며, 최댓값은 각각 0.15 m^{-1} , 0.17 m^{-1} 로 나타났다.

세종 부두와 세종 곶에서 72시간 동안 CDOM 변화 양상은 다르게 나타났다. 세종 부두의 경우 72시간 동안 각 파장에서 CDOM 농도는 큰 변화폭이 나타나지 않고, 비교적 유사한 양상으로 나타났다. 낮과 밤의 변동패턴을 확인할 수 있었고, 낮 시간대에 CDOM의 주기적인 감소가 있었다. 반면 세종 곶의 경우 모니터링 시작 후 16시간에서 28시간 사이에 300 nm, 325 nm에서 최대 2.38 m⁻¹의 높은 농도의 pulse가 나타난 것을 확인하였다(Fig. 4). 이는 세종 부두와 세종 곶에서 인위적인 요인에 의해 CDOM 변동이 일어난다는 것을 의미한다. 세종 부두의 경우 72시간 동안 CDOM 변동은 동일한 요인에 의해 조절된 반면, 세종 곶은 16시간에서 28시간 사이에 외부적인 요인에 의해 영향을 받은 것으로 판단하였다. 이를 통해 외부적인 요인에 의해 영향을 받지 않는 세종

부두가 장기적인 CDOM 모니터링 장소로서 적합하다고 판단하여 세종 부두를 연간 모니터링 장소로 선택하였다.

3.4 세종 부두에서 CDOM의 연간 모니터링

2010년 남극 세종 부두에서 연간 CDOM 변동 양상을 파악하고자 봄(9-11월), 여름(2월), 가을(3-5월), 겨울(6-8월)에 걸쳐 1년 동안 정기적으로 채수하여 CDOM 농도를 측정하였다(Fig. 5). a_{cdom}(300)은 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 0.35 m⁻¹, 0.40 m⁻¹, 0.48 m⁻¹, 0.42 m⁻¹로 나타났으며, a_{cdom}(325)는 각각 0.20 m⁻¹, 0.24 m⁻¹, 0.32 m⁻¹, 0.29 m⁻¹의 값을 보였다. a_{cdom}(412)는 각각 0.09 m⁻¹, 0.07 m⁻¹, 0.13 m⁻¹, 0.14 m⁻¹의 값을 보였다.

자외선 영역에 해당하는 파장대인 300 nm와 325 nm에서 a_{cdom}은 봄철 최소, 가을철 최댓값을 보였으며, 가시광선 영역인 412 nm에서 a_{cdom}은 여름철 최소, 겨울철 최댓값을 보였다. 봄, 여름철에는 얼음 층이 녹아 해수면이 노출되고 태양 복사에너지가 증가함에 따라 CDOM의 광분해가 증가하여 이 시기에 최솟값을 보인 것으로 파악하였다. 반면 가을, 겨울철은 해빙이 점차 생성되어 일조량이 감소함에 따라 CDOM의 광분해가 저해되고, 표층과 저층 간 수온 차가 감소하여 수직혼합이 활발해져 CDOM이 공급됨에 따라 이 시기에 최댓값을 보인 것으로 생각된다. 하지만 연간 CDOM 모니터링에서 이용한 시료의 개수가 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 1개, 8개, 27개, 13개로 계절별로 시료 수 차이가 있으며, 봄과 여름에는 시료 수가 많지 않아 추후에 더 많은 시료를 확보하여 확인할 필요가 있을 것으로 판단된다.

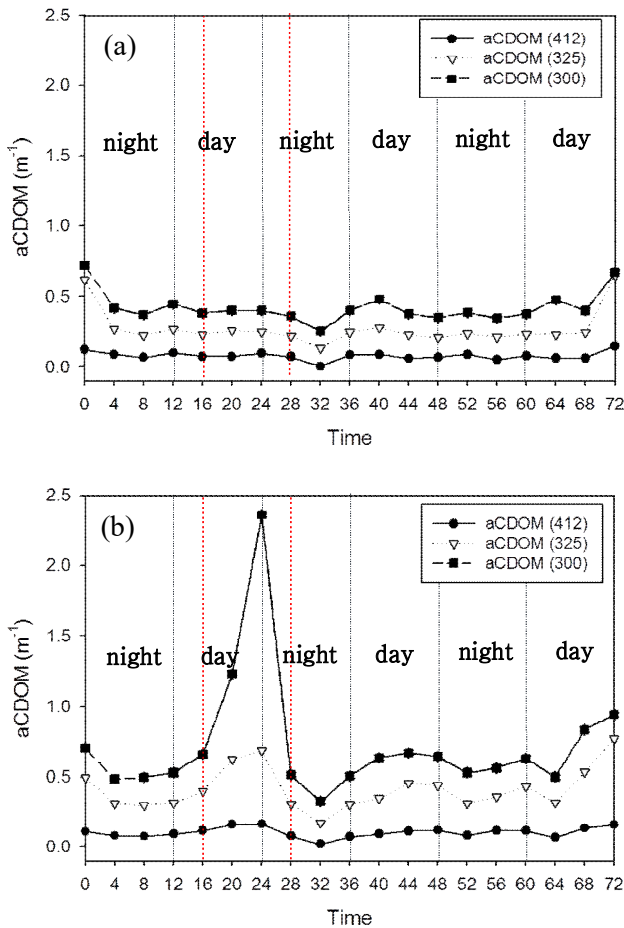


Fig. 4. Time-series variation of CDOM in (a) Sejong Dock and (b) Sejong Cape from 19:00 on January 30, 2010. Red line indicates the pulse appeared between 16 and 28 hours after the start of monitoring in the Sejong Cape. Black line indicates day and night at 12 hour intervals.

3.5 다른 연구 해역과의 비교

본 연구 해역인 아남극대에 해당하는 세종 기지 부근 CDOM 농도가 남극해의 변동과 잘 연동되는지 판단하기 위해, 본 연구 해역에서 수행한 CDOM 농도를 남극의 다른 해역과 비교해 보았다(Table 1). 세종 기지에서 측정한 CDOM이 남극 전체를 대표할 수 있는지 보기 위해서는 같은 시기에 다른 해역에서 측정한 CDOM 농도와 비교해 볼 필요가 있다. 하지만 2010년 남극의 다른 해역에서 측정한 CDOM 농도가 없어 직접적인 비교는 할 수 없었다.

대신 같은 해역, 다른 시기에 얻은 연구결과와 본 연구결과를 비교하였다. 2010년 여름철 킹조지 섬(Maxwell Bay)의 표층 a_{cdom}(325)은 평균 0.24 m⁻¹로 나타났으며, 2004년 킹조지 섬에서 관측한 0.18 m⁻¹와 비교했을 때(Ortega-Retuerta et al., 2010), 2004년에 비해 2010년에 CDOM 농도가 상대적으로 증가한 것으로 확인되었다.

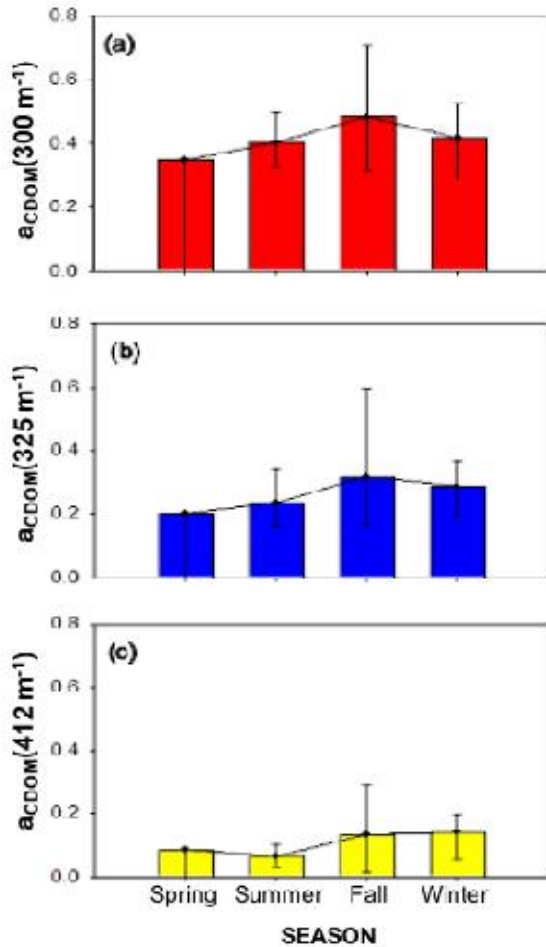


Fig. 5. One year monitoring of the seasonal variation of surface (a) $a_{\text{cdom}}(300)$, (b) $a_{\text{cdom}}(325)$ and (c) $a_{\text{cdom}}(412)$ from February to November 2010.

Table 1. Comparative values of CDOM absorption coefficients reported in different sites at Antarctic Ocean

Study area	$a_{\text{cdom}}(325) (\text{m}^{-1})$		Reference
	av.	range	
Deception Island(2004)	1.30		
King George Island(2004)	0.18		
Weddell Sea	0.44		Ortega-Retuerta et al., 2010
Bellingshausen Sea(2005)	0.41		
Bransfield Strait(2005)	0.23		
Ross Sea(2014)			D'sa and Kim, 2017
New Zealand shelf water	0.18		
Terra Nova Bay	0.19		
Amundsen Sea(2014)			Lee et al., 2016
Sea Ice Zone	0.14	0.11-0.17	
Amundsen Sea Polynya	1.07	0.49-2.01	
Ice Shelf	0.40	0.36-0.43	
King George Island(2010)			This study
Maxwell Bay	0.24	0.16-0.34	

4. 결 론

본 연구는 기후 변화에 따른 장기적인 CDOM 농도 변화를 모니터링하기 위한 목적으로 세종 기지가 적합한지 평가하기 위해 실시하였다. 세종 기지가 위치한 킹조지 섬에서 장기적인 CDOM 모니터링에 적합한 사이트를 찾기 위해 Maxwell Bay와 Marian Cove에서 CDOM의 수평, 수직적 농도를 살펴본 결과, 20 m 내에서 혼합이 활발하고 모든 파장대에서 유사한 CDOM 분포 양상을 보이는 Maxwell Bay가 적합한 사이트라고 판단하였다. 이후 Maxwell Bay 중 CDOM 모니터링에 적합한 사이트를 찾기 위해 세종 부두와 세종 곳에서 72시간 동안 CDOM 농도 변화 양상을 살펴보았다. 세종 부두의 경우 72시간 동안의 CDOM 농도가 큰 변화폭 없이 나타난 반면, 세종 곳에서는 최대 2.38 m^{-1} 높이의 pulse가 나타났다. 이는 세종 곳에서는 외부적인 요인에 의한 영향을 받는다는 것을 의미한다. 이러한 관찰을 통해 장기적인 CDOM 모니터링 장소로서 외부 영향을 받는 세종 곳보다는 외부 영향을 받지 않는 세종 부두가 적합하다는 것으로 판단하였다. 이후 세종 부두에서 연간 CDOM 변동을 살펴본 결과, 자외선 영역에 해당하는 파장에서는 봄철 최소, 가을철 최대값을 보인 반면, 가시광선 영역에 해당하는 파장에서는 여름철 최소, 겨울철 최대를 보였다. 하지만 연간 CDOM 모니터링에서 이용한 시료의 개수가 봄, 여름철에 각각 1개, 8개로 개수가 적은 편이므로 추후에 더 많은 시료를 확보하거나 위성자료와의 연계로 확인할 필요가 있다. 따라서 이와 같은 직접 개별 해수와 정점별 측정을 통해서, 향후 기지의 운영 중에 극지연구 활동을 위한 정기적인 방문이 이루어지는 장소인 세종 기지에서 기후 변화에 따른 CDOM 변동을 모니터링하기에 적합한 세종 부두에서 CDOM을 장기 모니터링 항목으로 채택되어 조사되도록 제안하고자 한다.

사 사

이 논문은 2017년 부경대학교 자율창의 연구비 사업의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

[1] Barbini, R., F. Colao, R. Fantoni, G. M. Ferrari, A. Lai, and A. Palucci(2003), Application of a lidar fluorosensor system to the continuous and remote monitoring of the Southern Ocean and Antarctic Ross Sea: Results collected during the XIII and XV Italian oceanographic campaigns, International Journal of Remote Sensing, Vol. 24, No. 16, pp. 3191-3204.

- [2] Blough, N. V., O. C. Zafriou, and J. Bonilla(1993), Optical absorption spectra of waters from the Orinoco River outflow: Terrestrial input of colored dissolved organic matter to the Caribbean, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, pp. 2271-2278.
- [3] Blough, N. V. and R. D. Vecchio(2002), Chromophoric DOM in the coastal ocean. In: Hansell DA, Carlson CA (eds) *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*, Academic press, San Diego, pp. 509-546.
- [4] Blough, N. V. and S. A. Green(1995), Spectroscopic characterization and remote sensing of nonliving organic matter. In: Zepp R.G., Sonntag C. (eds) *The Role of Nonliving organic matter in the Earth's Carbon Cycle*, John Wiley and Sons, Berlin, pp. 23-45.
- [5] Bricaud, A., M. Babin, H. Claustre, J. Ras, and F. Tièche (2010), Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, No. C8.
- [6] Brogi, S. R., S. Y. Ha, K. W. Kim, M. Derrien, Y. K. Lee, and J. Hur(2018), Optical and molecular characterization of dissolved organic matter (DOM) in the Arctic ice core and the underlying seawater (Cambridge Bay, Canada): Implication for increased autochthonous DOM during ice melting, *Science of the Total Environment*, Vol. 627, pp. 802-811.
- [7] D'Sa, E. J. and H. C. Kim(2017), Surface Gradients in Dissolved Organic Matter Absorption and Fluorescence Properties along the New Zealand Sector of the Southern Ocean, *Frontiers in Marine Science*, Vol. 4: 21.
- [8] Hansell, D. A.(2002), DOC in the Global Ocean Carbon Cycle. Hansell D.A., Carlson C. A. (eds) *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*, Academic press, San Diego, pp. 685-715.
- [9] Hill, V. J.(2008), Impacts of chromophoric dissolved organic material on surface ocean heating in the Chukchi Sea, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, No. C7, pp. C07024.
- [10] Kahru, M. and B. G. Mitchell(2001), Seasonal and nonseasonal variability of satellite-derived chlorophyll and dissolved organic matter concentration in the California Current, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, pp. 2517-2529.
- [11] Kieber, D. J., D. A. Toole, and R. P. Kiene(2009), Chromophoric dissolved organic matter cycling during a Ross Sea Phaeocystis Antarctica bloom. In: Krupnik I, Lang MA, Miller SE (eds) *Smithsonian at the Poles: Contributions to International Polar Year Science - a Smithsonian Contribution to Knowledge*, Smithsonian Institute Scholarly Press, Washington DC, pp. 319-333.
- [12] Kieber, R. J., L. H. Hydro, and P. J. Seaton(1997), Photooxidation of triglycerides and fatty acids in seawater: Implication toward the formation of marine humic substances, *Limnology and Oceanography*, Vol 42, No. 6, pp. 1454-1462.
- [13] Lee, Y. C., M. O. Park, J. Y. Jung, E. J. Yang, and S. H. Lee(2016), Taxonomic variability of phytoplankton and relationship with production of CDOM in the polynya of the Amundsen Sea, Antarctica, *Deep-Sea Research Part II*, Vol. 123, pp. 30-41.
- [14] Meiners, K. M., S. Papadimitriou, D. N. Thomas, L. Norman, and G. S. Dieckmann(2009), Biogeochemical conditions and ice algal photosynthetic parameters in Weddell Sea ice during early spring, *Polar Biology*, Vol. 32, No. 7, pp. 1055-1065.
- [15] Mitchell, B. G., M. Kahru, J. Wieland, and M. Stramska (2002), Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples, in *Ocean Optics Protocols for satellite Ocean Color Sensor Validation*, edited by Muller J and Fargion LGS, NASA, Hanover, Germany, pp. 231-257.
- [16] Mopper, K., X. Zhou, R. J. Kieber, D. J. Kieber, R. J. Sikorski and R. D. Jones(1991), Photochemical degradation of dissolved organic carbon and its impact on the oceanic carbon cycle, *Nature*, Vol. 353, pp. 60-62.
- [17] Nelson, N. B. and D. A. Siegel(2002), Chromophoric DOM in the open ocean. In: Hansell DA, Carlson CA (eds) *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*, Academic press, San Diego, pp. 547-578.
- [18] Norman, L., D. N. Tomas, C. A. Stedmon, M. A. Granskog, S. Papadimitriou, R. H. Krapp, K. M. Meiners, D. Lannuzel, P. Merwe, and G. S. Dieckmann(2011), The characteristics of dissolved organic matter (DOM) and chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Antarctic sea ice, *Deep-Sea Research Part II*, Vol. 58, pp. 1075-1091.
- [19] Ortega-Retuerta, E., I. Reche I, E. P. Villena, S. Agusti, and C. M. Duarte(2010), Distribution and photoreactivity of chromophoric dissolved organic matter in the Antarctic Peninsula, *Marine Chemistry*, Vol. 118, pp. 129-139.
- [20] Pegau, W. S.(2002), Inherent optical properties of the central Arctic surface waters, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. C10, pp. S16-1-S16-7.
- [21] Siegel, D. A. and A. F. Michaels(1996), Quantification of

non-algal light attenuation in the Sargasso Sea: Implications for biogeochemistry and remote sensing, *Deep-Sea Research Part II*, Vol. 43, No. 2-3, pp. 321-345.

- [22] Stedmon, C. A., R. M. W. Amon, A. J. Rinehart, and S. A. Walker(2011), The supply and characteristics of colored dissolved organic matter (CDOM) in the Arctic Ocean: Pan Arctic trends and differences., *Marine Chemistry*, Vol. 124, pp. 108-118.
- [23] Steig, E. J., D. P. Schneider, S. D. Rutherford, M. E. Mann, J. C. Comiso, and D. T. Shindell(2009), Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957, *International Geophysical Year. nature*, Vol. 457, pp. 459-462.
- [24] The IMBIE team(2018), Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017, *Nature*, Vol. 558, pp. 219-222.
- [25] Thomas, D. N., G. Kattner, R. Engbrodt, V. Giannelli, H. Kennedy, C. Haas, and G. S. Dieckmann(2001), Dissolved organic matter in Antarctic sea ice, *Annals of Glaciology*, Vol. 33, pp. 297-303.
- [26] Twardowski, M. S. and P. L. Donaghay(2001), Separating in situ and terrigenous sources of absorption by dissolved materials in coastal waters, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. C2, pp. 2545-2560.
- [27] Underwood, G. J. C., S. Fietz, S. Papadimitriou, D. N. Thomas, and G. S. Dieckmann(2010), Distribution and composition of dissolved extracellular polymeric substances (EPS) in Antarctic sea ice, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 404, pp. 1-19.
- [28] Vodacek, A., N. V. Blough, M. D. DeGrandpre, E. T. Peltzer, and R. K. Nelson(1997), Seasonal variation of CDOM and DOC in the Middle Atlantic Bight: Terrestrial inputs and photooxidation, *Limnology and Oceanography*, Vol. 42, No. 4, pp. 674-686.

Received : 2019. 08. 26.

Revised : 2019. 10. 16. (1st)

: 2019. 10. 31. (2nd)

Accepted : 2019. 12. 27.