

극지 식물플랑크톤의 유색 용존 유기물의 생산과 광반응성에 대한 자외선 영향

박미옥* · 하선용**†

* 부경대학교 교수, ** 극지연구소 책임연구원

UV Effects on Production and Photoreactivity of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Media of Polar Marine Phytoplanktons

Mi Ok Park* · Sun-Yong Ha**†

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

** Researcher, Korea Polar Research Institute, Incheon, 21990, Korea

요약 : 본 연구는 극지 식물플랑크톤의 자외선 영향을 파악하기 위해, *Phaeocystis antarctica*와 *Phaeocystis pouchetii*를 대상으로 유색 용존 유기물의 생산과 광반응성을 평가하였다. 강한 자외선에 노출 배양 시, 가시광선 파장대에서 유색 용존 유기물의 흡광도는 두 식물플랑크톤 모두 배양 초기에 비해 48시간 동안 감소하였다. 반면, 자외선 파장에서는 *P. antarctica*는 48시간 배양 후, 유색 용존 유기물의 흡광도는 초기 농도에 비해 약 30% 감소하였지만, *P. pouchetii*의 흡광도는 오히려 10% 증가한 경향을 보였다. 이 결과들은 강한 자외선에 노출될 경우, *P. antarctica*이 생산한 유색 용존 유기물은 광분해에 의한 감소로 인해 해수 중 수중 생태계에 자외선 차단 효과는 감소하는 반면, *P. pouchetii*가 생산한 유색 용존 유기물에 의한 광보호 효과가 더 효율적임을 알 수 있었다. 또한, 자외선 영향 하에서 배양된 *P. pouchetii*의 배양액에서 시간에 따라 증가한 유색 용존 유기물의 형광 특성이 지구 거대물질로 알려진 humic-like (C-peak)와 일치하여, 이는 자외선 차단 물질로 알려진 MAAs 생물 생산에 의한 것임을 확인하였다. 이는 기후변화에 의한 성층화가 강화되는 극지 해양환경에서, 광반응성이 낮은 *P. pouchetii*가 용존 유기물의 증가에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 유색 용존 유기물, 극지 식물플랑크톤, 자외선 배양실험, 광반응성, *Phaeocystis antarctica*, *Phaeocystis pouchetii*

Abstract : In this study, we evaluated the production and photoreactivity of CDOM of two polar phytoplanktons - *Phaeocystis antarctica* and *Phaeocystis pouchetii*, in order to find out UV effects on phytoplanktons. In visible region, CDOM in media of both phytoplanktons under UV-R decreased during 48hrs incubation period. However, in UV region CDOM decreased 30% in the media of *P. antarctica*, but increased 10% in media of *P. pouchetii*, compared to CDOM concentrations of control after 48 hr incubation. This result indicates that biota in polar environment would not well protected from UV-R harmful effect when *P. antarctica* is dominant because of loss of CDOM, but when *P. pouchetii* is dominant species, production of UV absorbing organic matter could play more efficiently for UV screening for marine biota. Also we confirmed that FDOM of humic substance (C-peak) produced by these phtoplanktons under UV-R stress were well matched with fluorescence characteristics of the UV-protecting compound, MAAs. This finding shows that *Phaeocystis pouchetii* with low photoreactivity would contribute to DOM pool of polar marine environment under stratification by global warming.

Key Words : Chromophoric dissolved organic matter (CDOM), Polar marine phytoplankton, UV-incubation experiment, Photoreactivity, *Phaeocystis antarctica*, *Phaeocystis pouchetii*

* First Author : mopark@pknu.ac.kr, 051-629-6575

† Corresponding Author : syha@kopri.re.kr, 032-760-5341

1. 서론

지구상의 모든 광합성을 하는 식물은 자외선으로부터 유해한 영향을 차단하기 위해 광보호 물질을 생성하는 생존전략을 가지고 있다. 특히 극지방에 서식하는 해양 식물플랑크톤은 자외선 환경에 노출되면, 탄소 고정능력과 엽록소 생성에 영향을 받아 일차 생산력이 저하되거나 생리적 활성에 영향을 받는다. 해수 중 유색 용존 유기물(Chromophoric Dissolved Organic Matter; CDOM)은 이러한 자외선의 악영향을 차단하는 역할을 한다고 알려져 있다(Nelson et al., 2010). 해수 중 생물체가 만든 광보호 물질을 포함한 유색 용존 유기물은 가시광선과 자외선 영역의 빛을 흡수하는 유기물로 정의되며, 식물플랑크톤은 유색 용존유기물의 주요한 공급원으로 삼출, 배설, 세포 파괴와 sloppy feeding에 의해 해수로 방출된다.

해수 중 유색 용존 유기물 농도가 급격히 감소할 경우, 극지역의 일차 생산자인 식물플랑크톤의 선택적 적응에 의한 군집 구조의 변화, 일차생산력 감소 그리고 탄소 순환 패턴의 변화를 초래할 수 있을 것으로 예상된다. 지난 수십 년간 오존층 파괴로 인한 자외선의 영향이 강했던 시기를 거치며, 특히 극지방이나 고위도 해역에서 생물들의 초기 생활 단계인 치어와 난과 같은 수중 생태계에 악영향에 대한 연구 결과가 알려져 왔다(Smith et al., 1992; Helbling et al., 1992; Karentz et al., 1991). 이후 오존층 파괴에 대한 이루어졌지만, 여전히 극지방의 자외선 투과에 의한 수중 생물에 대한 영향은 일차생산력 억제, DNA 변이나, 세포 내 단백질 합성에도 악영향을 끼치는 것으로 보고된 바 있다(Karentz et al., 1991; Boelen et al., 2000). 이처럼 오존층 파괴로 인한 자외선은 생태계의 일차 생산자인 식물플랑크톤의 신진대사나 일차생산력 그리고 생화학적 과정도 영향을 주며, 식물플랑크톤의 종마다 다르게 작용한다고 밝혀진바 있다(Ha et al., 2012; Vernet and Whitehead, 1996). Ha(2012)는 식물플랑크톤의 탄소 고정 능력과 엽록소에 대한 자외선의 영향을 배양 실험과 북극 현장 실험을 통해 보고하며, 극지 식물플랑크톤들이 유해한 자외선을 차단하기 위해 세포 내 자외선 차단 물질로 알려진 Mycosporine Amino Acids(MAAs)를 분비하여 보호한다고 보고한 바 있다. 생물체는 육상뿐 아니라 해양에서도 자신을 보호하기 위해 광보호 물질을 발현하여 자외선으로부터 유해한 영향을 차단하는 생존전략을 가지고 있다(Moeller et al., 2005). MAAs 외에도, 식물플랑크톤은 카로틴 색소 중 β -carotene과 Diadinoxanthin을 대표적인 광보호 색소로 이용하고 있다(Laurion et al., 2002).

특히 이런 자외선의 영향은 극지 해역에서 더 두드러지게 나타나는 원인이 겨울철 빛이 없는 상태에서부터 봄철 생물의

성장과 번식이 증가하는 시기에 자외선에 노출되기 때문에 자외선의 생물에 대한 악영향이 극대화될 수 있다. 남극해의 식물플랑크톤은 오존층이 파괴되기 시작하는 10월부터 12월 사이에 강한 자외선에 노출될 때, 자외선 흡수 물질 MAAs를 높은 농도로 생성하여 극한 환경으로부터 자신을 보호하는 전략을 가지고 있으며, 식물플랑크톤의 종류에 따라 자외선 차단 물질의 종류와 생성물이 각기 다르다고 보고하였다(Garcia-Pichel, 1994; Ha et al., 2012). 해양의 식물플랑크톤과 박테리아 등에 의해서 해수 중으로 공급되는 유색 용존 유기물은 자외선과 가시광선 영역에서 빛을 흡수하므로 대기 중 온난화 기체에 의한 해수 수온 상승을 더욱 증가시키거나, 광반응에 의해 용존 유기물 중 일부를 산화시켜 더 작은 크기의 유기물로 분해하고 궁극적으로 이산화탄소로 무기화시킬 수 있다고 보고된 바 있다(Nelson et al., 2010). 이와 같은 배경으로 최근 유색 용존 유기물 연구에 대한 관심이 증가하고 있으며, Stedmon et al.(2011)은 북극 해역에 유입되는 강으로부터 유입되는 용존 유기 탄소와 유색 용존 유기물의 관계를 비교하여, 해수 중 유색 용존 유기물의 증가 추세를 모니터링하기 위한 연구 내용을 보고하였다. 이처럼 극지 해역의 유색 용존 유기물의 농도는 온난화에 의한 동토층으로부터 해동에 의해 유입되는 현상과 더불어 해양에서 일차 생산자인 식물플랑크톤의 종 조성 변동이 미치는 용존 유기물 저장고에 대한 공급에 대한 영향과 현장 배양 실험과 인공 자외선에 의한 식물플랑크톤의 유색 용존 유기물의 생산과 광반응성에 대한 관심이 고조되고 있다(Ortega-Retuerta et al., 2009; Vernet and Whitehead 1996; Garcia-Pichel, 1994; Ha et al., 2012).

본 연구에서는 남극과 북극에서 봄철 증식을 일으키는 Prymnesiophyte 분류군 중 우점종 2종을 선택하여, 인공 자외선을 포함한 다양한 빛 조건 하에서 극지 해양의 식물플랑크톤이 분비하는 유색 용존 유기물의 생산과 자외선에 대한 광반응성에 대한 영향을 알아보기 위해 배양 실험을 실시하였다. 배양액 중 유색 용존 유기물의 흡광도의 변화를 측정하고, 남극과 북극에서 각각 분리한 *Phaeocystis* 속이 분비하는 유기물의 형광 특성의 변화를 통해, 자외선의 유해한 영향에 대한 식물플랑크톤의 보호물질 생성과의 관계를 파악하고자 하였다. 또한 이들의 유색 용존 유기물의 광반응성의 차이로 인해 해수 중 생물들을 자외선으로부터 보호하는 역할의 효율성에 대해 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 생물

본 연구의 배양 실험에 사용한 식물플랑크톤은 극 해역의 우

점 식물플랑크톤 중 Prymnesiophyte 분류군에서 남극(*Phaeocystis antarctica*; 이후 남극종으로 언급)과 북극(*Phaeocystis pouchetii*; 이후 북극종으로 언급)(Fig. 1)에서 분리한 2종을 극지연구소 극지생물 재현 연구실(KOPRI Culture Collections for Polar Microorganisms)로부터 제공받아 사용했으며, 계대 배양 후 1주일간 순치 후 실험에 사용하였다.

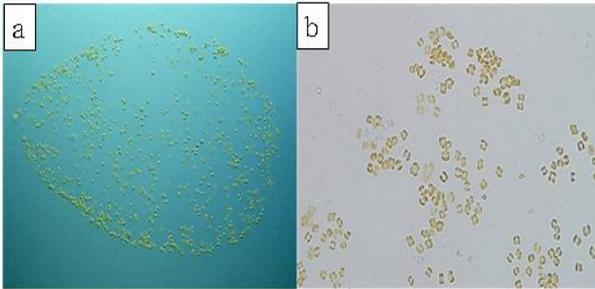


Fig. 1. (a) *P. antarctica* and (b) *P. pouchetii*.

*P. pouchetii*의 배양액에는 f2 배지와 같은 성분에 미량금속만 추가된 L1 배지를 사용하였다(Guillard and Ryther, 1962). 두 종의 식물플랑크톤은 계대 배양 시 $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량으로 배양실 빛 조건을 맞추었으며, 노출 실험 전 마지막 계대 배양은 실험 전 일주일간 $15 \sim 20 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 조건으로 순응시켰다. 그 후 자외선 노출 배양기로 이동 후 약 24시간 암조건 상태를 유지, 순응시킨 후 인공 자외선 아래 노출 실험에 사용하였다.

2.2 배양 실험에 사용된 빛 조건

실내 배양에 적합한 빛 조건을 유지하기 위하여 295 nm 및 395 nm 두 종류의 cutoff 필터를 사용하였다. 실험에 사용한 빛 조건은 1: UV-A+B + PAR, 2: UV-A + PAR, 3: PAR로 사용하였으며, 일부 결과는 자외선 + 광합성 유효광(UV-A+B + PAR)과 광합성 유효광(PAR) 조건에 대한 결과로 제시하였다.

295 nm cutoff 필터(Ultraphan, UV Opak, Digefra, Munich, Germany)는 중파자외선(UV-B)과 장파 자외선(UV-A) 뿐만 아니라 광합성 유효광(PAR)이 모두 투과되는 반면에, 395 nm cutoff 필터(Ultraphan, UV Opak, Digefra, Munich, Germany)는 광합성 유효광(PAR)만 투과되는 차이가 있다(Fig. 2). 인공 자외선의 광원은 상업적으로 판매되는 UV 램프를 사용했으며, 중파 자외선(UV-B) 램프(ActionicBL 15W, PHILIPS, Holland), 장파 자외선(UV-A) 램프(TL-D 15W, PHILIPS, Holland), 그리고 일반 visible 램프들이 사용되었다. 자외선 광량은 UVX® radiometer(Model UVX-25 and UVX-31)를 통하여 250 nm(UV-B)에서 $5.2 \mu\text{W}/\text{m}^2$, 250 nm(UV-A)에서 $12.3 \mu\text{W}/\text{m}^2$, 그리고 395 nm

(PAR)에서 $1.8 \mu\text{W}/\text{m}^2$ 세기로 조사하였다. 또한 배양하는 동안 총 광량은 LI-COR 광량계(Spherical Quantum Sensor, U.S.A)를 사용하여 $14 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 가 측정되었다.

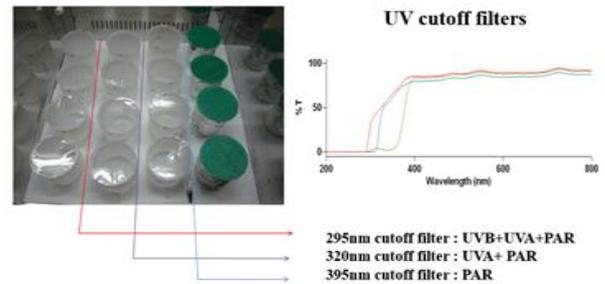


Fig. 2. UV exposure incubation experiment with UV cutoff filter.

2.3 배양 실험

서로 다른 cutoff UV-filter(295 nm, 395 nm)를 이용하여 광합성 유효광(PAR)과 광합성 유효광을 포함한 인공 자외선(UV-A + PAR, UVB+UVA+PAR)에 함께 노출시켜 배양 실험을 실시하였다(Fig. 2). 배양하는 동안 총광량은 LI-COR 광량계(Spherical Quantum Sensor, U.S.A)를 사용하여 $14 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 가 측정되었다. 배양 온도는 4°C 를 유지하면서, 총 4일(96시간)까지 인공 자외선 노출 실험을 실시하였다. 두 종의 종주 보관은 배양실 광량 $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 하에서 배양온도 4°C 를 유지하였다. 시간에 따른 CDOM과 FDOM의 변화를 알아보기 위해 배양을 시작하기 전에 CDOM과 FDOM를 측정하고(Conrol), 배양 시작 후 24시간마다 CDOM과 FDOM의 세기를 측정하였다. 인공 광량은 360 nm(PAR)에서 $5.3 \text{ W}/\text{cm}^2$, 그리고 260 nm(UV-B) 과장 영역대에서 $3.9 \text{ W}/\text{cm}^2$ 의 세기로, 자연 상태보다 훨씬 더 높은 광량을 줌으로써, 자외선의 효과를 극대화하였다. 48시간 배양 후에도 각각 *P. antarctica*와 *P. pouchetii*는 72시간과 96시간 동안 배양하며, 흡광도와 형광 특성의 변화를 관찰하였다.

2.4 CDOM의 광학 특성 측정

배양 실험 중 배양 시료는 각각 $0.45 \mu\text{m}$ GF/F filter, $0.2 \mu\text{m}$ polycarbonate nuclepore filter를 이용해 여과 후, 24시간 간격으로, 총 48시간 동안 CDOM과 형광 특성인 FDOM의 광학 특성을 조사하였다. 측정은 24시간 간격으로 최대 96시간까지 CDOM의 흡광도와 FDOM의 형광특성을 측정하였다. 흡광도는 Spectrophotometer(Cary50) 이용하여 300 nm - 700 nm에서 과장 구간에서 측정을 하였고, 두 식물플랑크톤의 배양액에 대한 aCDOM(300)과 aCDOM(436)을 비교하였다(Ha et al., 2012). FDOM의 형광 특성은 Fluoromax 4(Horiba Scientific, USA)

를 이용하여, 배양 기간 동안 형광 세기 변화를 $\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 285/340 \text{ nm}$ (T-peak)와 $\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 345/440 \text{ nm}$ (C-peak)에 대해 24 시간 간격으로 48시간 동안 측정하였다. 광저해 및 광분해에 의한 배양액 중 흡광 세기의 48시간 후 변화를 대조군과 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CDOM

3.1.1 빛 조건에 따른 흡광도 변화

세 가지 빛 조건에 따른 48시간 동안 식물플랑크톤의 배양액 중 흡광도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 남극종 *P. antarctica*의 경우, UV-A+B + PAR (자외선 노출 환경) 하에서 48시간 후 CDOM의 흡광도가 초기 조건에 비해 약 30% 감소하였다(Fig. 3a). 남극종 *P. antarctica*의 배양액에서 48시간 후 UV-A + PAR 빛 조건 하에서 UV-A+B + PAR 광조건에 비해 aCDOM(300)이 가장 높은 34% 감소폭을 보였고, PAR 빛 조건에서 가장 낮은 17% 감소를 보였다. 자외선 조건에서 배양된 실험군의 배양액의 흡광도가 광합성 유효광(PAR) 조건에서 배양된 실험군에 비해 더 큰 감소폭(30~34%)을 보였다.

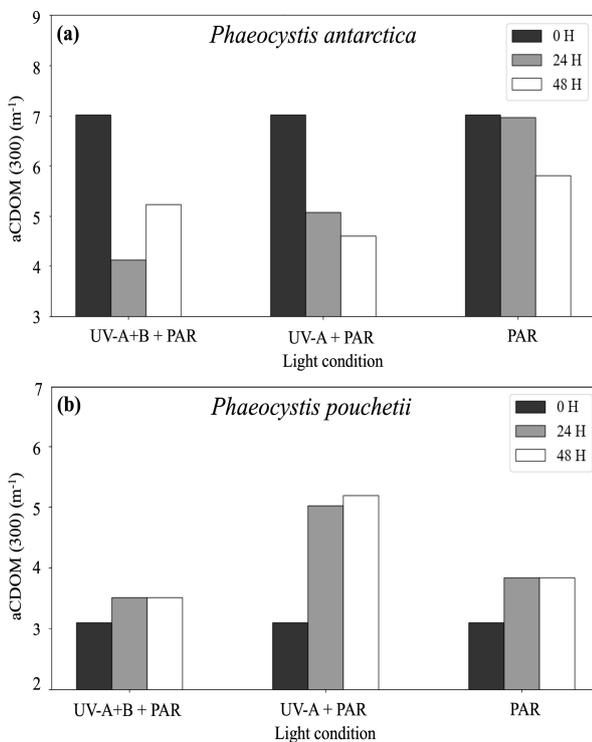


Fig. 3. Changes of aCDOM in media of a) *P. antarctica* and b) *P. pouchetii* under different light conditions.

이와 달리, 북극종 *P. pouchetii*는 UV-A+B + PAR 빛 조건 하에서 CDOM의 흡광도는(Fig. 3b) 초기 조건에 비해 16%만 증가하였으며, 시간에 따른 변화도 미미한 편이다. 다만 예외적으로 UV-A + PAR 빛 조건 하에서(Fig. 3b-2), 북극종 *P. pouchetii*의 배양액의 CDOM의 흡광도가 24시간 후 초기 조건에 비해 66% 증가하였다. 그러나 48시간 후 다시 감소하여, 초기 조건에 비해 16% 증가로 그쳤다. PAR 빛 조건에서는 UV-A+B + PAR 빛 조건에서의 값과 유사한 17% 증가를 보였다(Fig. 3b-3). 북극종 *P. pouchetii*의 배양액의 CDOM의 흡광도는 자외선과 광합성 유효광 조건 아래에서, 증가한 수준이 유사하였다. 이러한 결과들은 강한 자외선에 노출될 경우, 남극종 *P. antarctica*가 생산한 CDOM에 의한 해수 중 자외선 차단 효과는 상대적으로 비효율적이며, 북극종이 생산한 CDOM에 의한 광보호 효과가 더 효율적임을 보여준다. 북극종 *P. pouchetii*는 자외선 노출 환경과 PAR 노출 환경에서 흡광도 값이 유사하여 근소한 차이를 보여, CDOM의 흡광도는 자외선에 대한 영향을 거의 받지 않음을 확인하였다.

3.1.2 흡광 파장에 따른 변화

남극종 *P. antarctica*는 단파장 영역인 aCDOM(300)과 광합성 유효광 영역 aCDOM(436)에서 CDOM의 흡광도가 배양 48시간 후 모두 감소하였다(Fig. 4, Fig. 5). 자외선 조건하에서는 초기 조건의 흡광도에 비해 24시간 후 38% 감소하였고, 48시간 후 다소 증가하여 30% 감소한 결과를 보였다. 광합성 유효광 조건 하에서는 24시간 후 미미한 증가를 보였으나 48시간 후 17% 증가하였다. 반면 북극 *P. pouchetii*의 경우 단파장 영역의 aCDOM(300)은 24시간 후 1% 미만의 증가를 보인 후 48시간까지 변화 없이 같은 수준을 유지하였고(Fig. 4), 가시광선 영역의 aCDOM(436)은 초기 농도보다 약 10% 감소하였다(Fig. 5).

3.2 FDOM

3.2.1 빛 조건에 따른 흡광도 변화

식물플랑크톤 성장 기간 중 FDOM의 생산 및 분해와 인공 자외선의 역할을 파악하기 위해, 배양액 중 FDOM(humic-like)의 초기 형광 세기와 48시간 후 형광 세기를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 두 식물플랑크톤의 배양액 중 C-peak($\lambda_{ex} / \lambda_{em} = 345/440 \text{ nm}$) 모두 48시간 후 증가폭은 차이가 있었지만 빛 조건과 관계없이 변화가 미미하거나 형광 세기가 증가한 양상이었다.

남극종 *P. antarctica* 배양액 중 C-peak(Humic-like FDOM)의 형광 세기는 자외선(UV-A+B + PAR) 조건에서 24시간과 48시간 후 초기 조건에 비해 각각 5%, 9% 감소하였다.

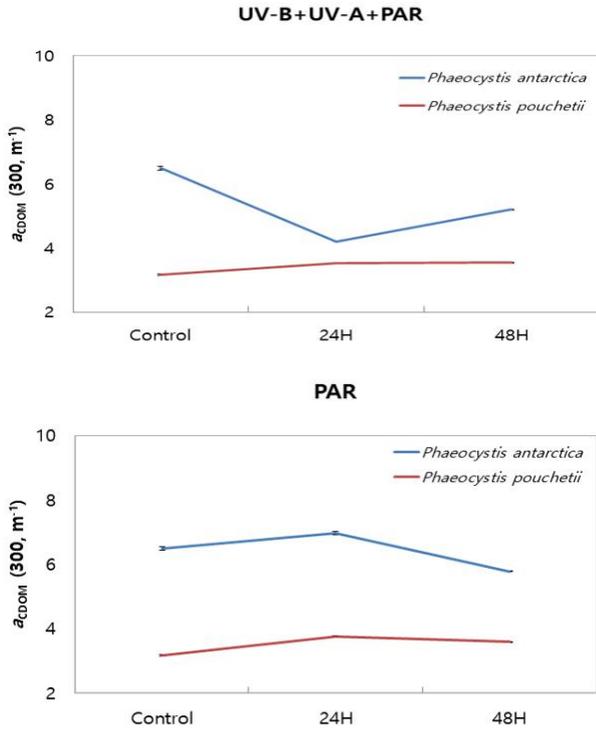


Fig. 4. Changes of aCDOM(300) in media of *P. antarctica* and *P. pouchetii* under UV-A+B + PAR and PAR.

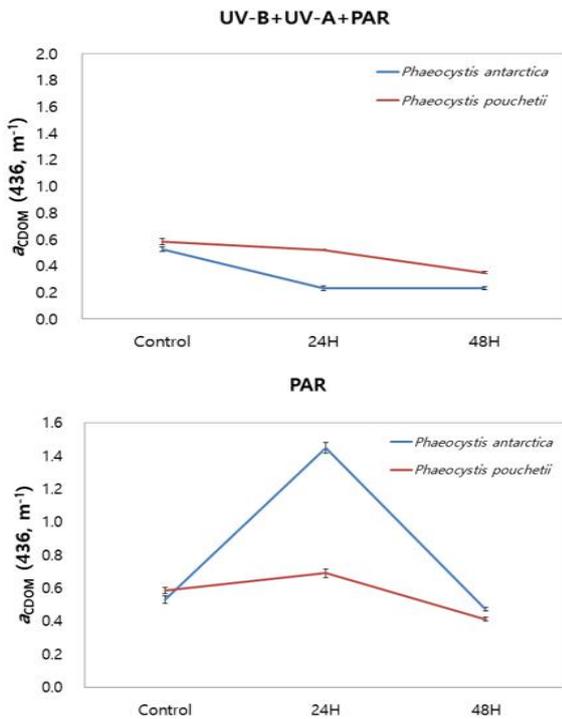


Fig. 5. Changes of aCDOM(436) in media of *P. antarctica* and *P. pouchetii* under UV-A+B and PAR.

광합성 유효광(PAR) 조건에서, 24 시간 후 16% 감소한 후 48시간 후 증가하여 초기 조건에 비해 1% 감소한 결과를 보였다. *P. pouchetii*의 배양액 중 자외선(UV-A+B + PAR)과 PAR에서 각각 7%, 18% 증가하여, 빛에 노출 시 humic-like FDOM이 생성된다는 것이 확인되었다(Fig. 6). 두 식물플랑크톤 배양액 중 humic-like FDOM의 증가는 1차 자외선 노출 실험에서도 같은 결과를 보여 육상 기원이라고 알려진 humic-like FDOM(C-peak)가 생물에 의해서도 생성된다는 것을 두 차례의 자외선 노출 실험 결과를 통해 확인하였다.

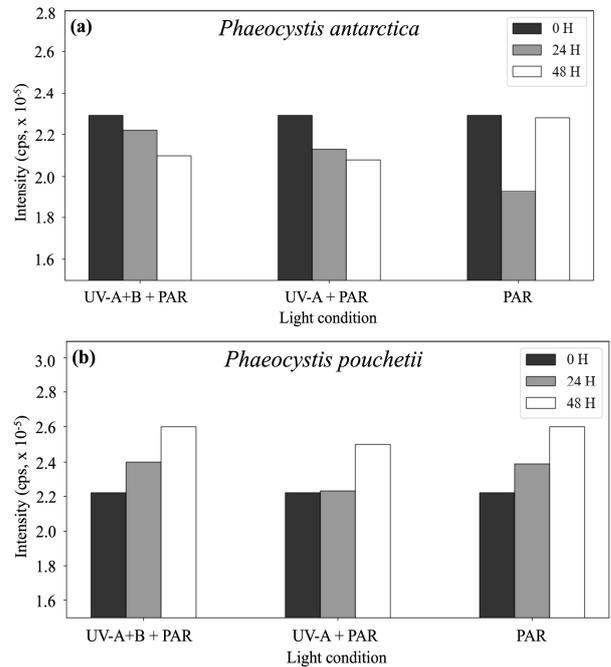


Fig. 6. Changes in FDOM (Humic-like peak) of the media of a) *P. antarctica* and b) *P. pouchetii* in the incubation experiment (humic-like peak: $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 345/440$ nm).

3.2.2 시간에 따른 형광 세기 변화

Phaeocystis 속의 북극종과 남극종, 두 종의 차이는 현격하게 다르게 반응하였다. 남극종의 경우, T-peak($\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 265/340$ nm)와 C-peak($\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 345/440$ nm) 모두 48시간 후 자외선 노출 환경에서 형광 세기 감소하였다. 반면 북극종은 인공 자외선 노출환경과 PAR 노출 환경에서 T-peak의 FDOM 형광 세기와 유사하여, 인공 자외선에 의한 광반응성이 민감하지 않았다.

(1) T-peak 형광세기의 변화

자외선 광조건에서, 남극종 *P. antarctica* 배양액 중 T-peak의 형광 세기는 48 시간 동안 초기 조건에 비해 미미한 변화

극지 식물플랑크톤의 유색 용존 유기물의 생산과 광반응성에 대한 자외선 영향

를 보였고(Fig. 7), 광합성 유효광(PAR) 조건에서도 1% 미만의 변화를 보였다. 충분한 시간을 두고 72시간까지 지속적으로 관찰한 결과, *P. antarctica*의 72시간 후 자외선 영향 하에서 8% 감소를 보였으며, 광합성 유효광 조건에서 형광 세기는 31% 감소하였다(Table 1). 반면 북극종 *P. pouchetti* 배양액 중 T-peak의 형광 세기는 24 시간 이내 초기 조건에 비해 50%의 급격한 감소를 보였고 48 시간 후 지속적으로 감소하여 73% 감소한 결과를 보였다(Fig. 7).

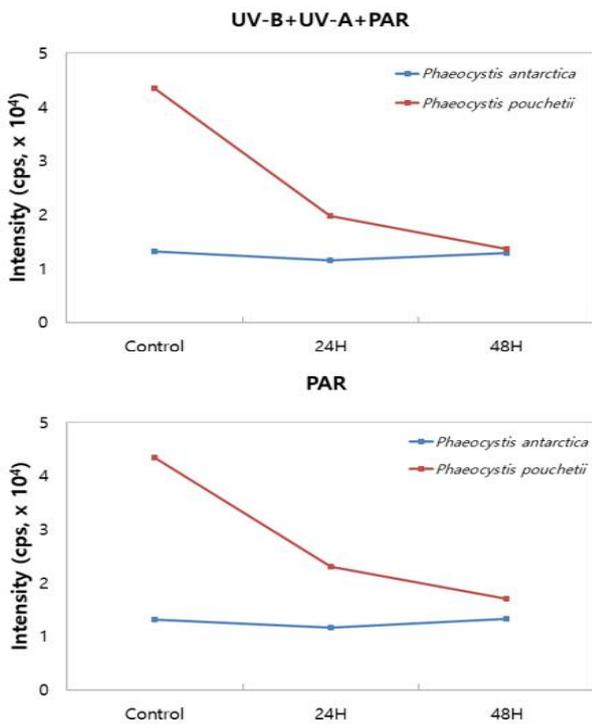


Fig. 7. Changes of FDOM (T-peak) in media of *P. antarctica* and *P. pouchetii* under UV-A+B and PAR (T-peak, $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 265/340$ nm).

Table 1. Result of changes in intensity of FDOM (C-peak) in media of *P. antarctica* and *P. pouchetti*

FDOM (C-peak)		<i>P. antarctica</i>	<i>P. pouchetti</i>
UV A+B	24h	-5%	+9%
	48h	-9%	+18%
PAR	24h	-16%	+9%
	48h	-1%	+18%

자외선 영향 하에서 48시간 배양 후 96시간까지 지속적으로 유지 관찰한 결과, 초기 조건에 비해 83%까지 감소한 것

을 확인하였다(Table 1). 실험 결과에서 자외선 영향 하에서 북극종 *P. pouchetti*의 배양액의 형광 용존 유기물은 남극종 *P. antarctica*의 형광 용존 유기물에 비해 광반응성이 높은 것으로 보이며, 배출 후 광분해가 신속하게 이루어짐을 알 수 있다.

(2) C-peak 형광세기의 변화

남극종 *P. antarctica* 배양액 중 C-peak(Humic-like FDOM)의 형광 세기는 자외선 조건에서 24시간과 48시간 후 초기 조건에 비해, 각각 5%, 9% 감소하였다. 광합성 유효광(PAR) 조건에서, 24시간 후 16% 감소하고, 48시간 후 증가하여 초기 조건에 비해 1% 감소한 결과를 보였다(Fig. 8).

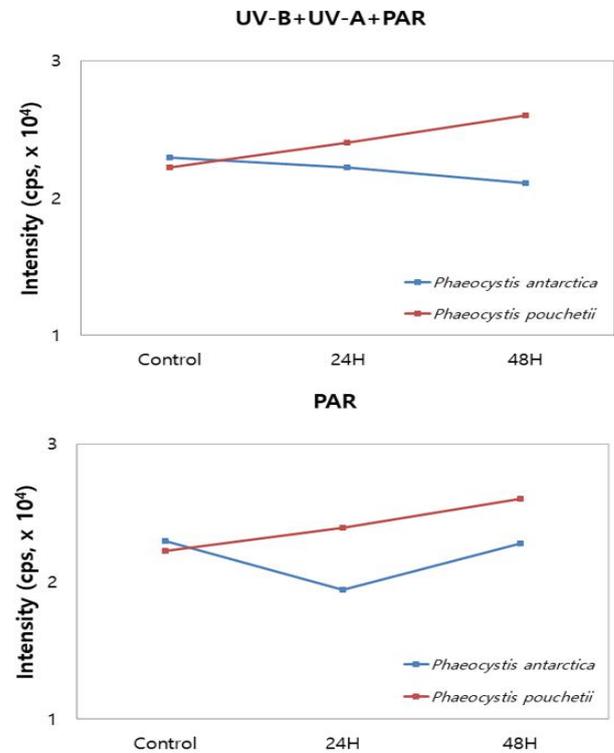


Fig. 8. Changes of FDOM(C-peak) in the media of *P. antarctica* and *P. pouchetti* under UV-A+B + PAR and PAR (Humic-like peak, $\lambda_{Ex} / \lambda_{Em} = 345/440$ nm).

북극종 *P. pouchetti*의 배양액 중 FDOM의 C-peak의 형광세기는 자외선 조건과 광합성 유효광 조건에서 48시간 배양 후 모두 18% 증가하였다. 두 식물플랑크톤의 자외선 영향에 대한 반응이 서로 상반되며, Humic-like FDOM로 알려진 C-peak의 시간에 따른 증가는 지금까지 알려진 지구 거대중합체인 부식물질에 의한 형광 특성으로 알려진 내용과도 부합하지 않는 결과이다. 이는 최근 들어 Romera-Castillo(2010)

등 몇몇 연구자들이 제시한 연구 결과에서도 알려져 있으나, 그 원인 물질에 대한 규명은 보류된 상태이다. Romera-Castillo (2010) 등은 배양 실험에서 짧은 시간 내에 C-peak($\lambda_{Ex} / \lambda_{Em} = 345/440 \text{ nm}$)의 특성을 가진 FDOM이 식물플랑크톤에 의해 생산 가능하다는 연구 결과로서 본 연구 결과와도 일치하는 내용이다. 이러한 사실은 한 가지 의문점을 제기했는데, 식물플랑크톤이 어떻게 오랜 시간에 걸쳐 생물체외에서 만들어지는 난분해성 유기물을 2-3일 기간 동안 배양실험을 통해 생성될 수 있는가 하는 부분이 남아 있었다. 본 실험과 식물플랑크톤을 이용한 배양 실험과 Ha et al.(2012)의 연구 결과에서 자외선흡수 물질의 생산에 대한 연구 결과 중 형광 특성이 C-peak와 겹치는 흡광과 형광의 파장대에서($\lambda_{Ex} / \lambda_{Em} = 345/440 \text{ nm}$) MAAs로 알려진 *P. pouchetii*의 형광특성이 일치한다. 이로써, 이 C-peak의 형광이 바로 *P. pouchetii* MAA의 형광으로부터 얻어진 것이라는 점을 본 실험에서 확인할 수 있었다.

3.3 자외선 노출에 의한 *P. antractica*와 *P. antractica*의 CDOM 생성 비교

본 연구에서 자외선과 광합성 유효광 조건 하에서 배양 실험을 한 결과, 북극종 *P. antractica*이 남극종 *P. antractica*에 비해 자외선에 영향에 따른 유색 용존 유기물(CDOM)의 농도 변화는 미미하고, FDOM(Humic-like)에 의한 형광 세기는 배양기간 동안 18% 증가한 양상을 보였다. 광합성 유효광 조건에서도 같은 증가한 변화를 보였다.

반면 남극종 *P. antractica*의 경우, 자외선 노출 배양 실험 48시간 후 초기 조건의 aCDOM(300)값에 비해 30% 감소를 보여 자외선 노출 시 CDOM의 감소가 현저하게 일어남을 알 수 있었다. 남극종 *P. antractica*의 광합성 유효광 조건 하에서 24시간 후 미소한 증가가 있지만 추후 48시간 경과 후 10% 미만의 감소를 보였다.

이는 북극종 *P. pouchetii*가 남극종 *P. antractica*에 비해 CDOM의 광반응성(photoreactivity)이 낮을 뿐 아니라 CDOM pool에 MAA와 같은 자외선 흡수 물질을 생체 내 생성하며, 이를 해수 중으로도 삼출하여 해양생물에 대한 자외선 차단 효과가 더 효과적으로 일어날 수 있다는 것을 보여 준다.

Ha(2012) 등은 광합성 유효광과 인공 자외선에 노출된 *P. pouchetii*의 MAA 농도는 시간에 따라 증가 양상을 모두 보이고 있으나, 광합성 유효광에 노출된 *P. pouchetii*보다 인공 자외선에 노출되었을 때 새로운 MAA의 생산 속도가 2배 정도 더 빠르게 생산 속도가 증가하였음을 보고하였다(Fig. 9).

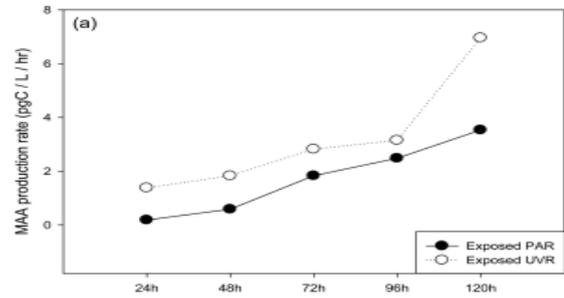


Fig. 9. MAA production of phytoplankton species of *P. pouchetii* (From Ha et al. 2012).

해양에서 군체 형성을 하는 *P. pouchetii* 세포들은 250~370 nm 사이에 강한 흡광도를 보이나, 편모형성 단계의 생활사에서는 자외선 흡수 물질이 결여되었다고 보고하고 있다(Marchant et al., 1991). Ha et al.(2012)은 실내 배양 기간 중 *P. pouchetii* 군체를 이루지 못한 상태로 보이며, 자외선에 의한 저해 현상이 엽록소 농도나 탄소 고정 효율이 급감하는 현상을 보였다고 보고하였다. 이는 *P. pouchetii*가 군체를 이루지 못할 경우, 자외선 흡수 물질의 생산이 상대적으로 군체 형성 시 만큼 자외선으로부터 보호되지 못하여 개별 세포에 대한 자외선 저해 현상으로 인해 탄소 고정능력의 감소 등 생리 상태가 급격히 악화됨을 보여주는 실험결과이다. 이들은 자외선 흡수 물질의 생산성이 증가하고 있는 반면 광합성 효율 및 생체량은 감소했다고 보고하였다. 상반되는 이 현상은 자외선 영향 하에서 세포에 해로운 영향을 받는 상태에서 식물플랑크톤이 스스로를 보호하기 위해 자외선 흡수 물질을 생산하고 있다는 것으로 이해된다.

실제로 와편모조류인 *Gyrodiniumdorsum*의 경우 MAAs의 생체 내 축적은 광합성 유효광 또는 중파자외선의 자극에 의해 강하게 유도되고(Liu et al., 2004; Singh et al., 2008), *Phaeocystis antarctica*의 경우 MAAs 유도는 광합성 유도광 또는 중파 자외선에 의해 합성되며, 광합성 유효광의 세기에 따라 MAAs 농도가 다르게 나타날 수 있다(Moisan and Mitchell, 2001)고 하였다. 자외선 흡수 물질의 생산은 식물플랑크톤에 따른 종 특이성에 의해 크게 좌우되는 것을 실내 배양실험과 현장 실험을 통해 얻어진 결과에서 확인되었다. 본 연구에서도 북극종과 남극종 *Phaeocystis* sp.는 배양 실험을 통해 서로 다른 반응을 보여주며, 자외선 영향 아래 중별 서로 다른 방법으로 자외선 흡수 물질의 생성을 하고 있다는 것을 형광 특성을 통해 확인하였다.

이처럼 극지의 자외선 증가로 인한 식물플랑크톤의 광적응 및 광보호 전략에 있어 자외선 흡수 물질의 생성 및 분포는 식물플랑크톤의 생존에 있어 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

본 연구의 결과로부터, *Phaeocystis*속은 자외선에 노출 시 MAAs를 생성하여 자외선 차단 효과를 높이고, DOM pool에 MAAs를 다른 종보다 많이 배출하는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 북극과 남극해 환경에서 *Phaeocystis*속의 bloom이 일어날 경우, 단일 세포에서 군집을 이루게 되어 더 높은 CDOM 배출이 일어나 해수 중 DOM pool에 기여가 증가하고, 이 중 일부는 MAAs를 포함하므로 해수 중 유색 용존 유기물의 농도가 증가할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구의 배양 실험 결과는 강한 자외선에 노출될 경우, 남극종 *Phaeocystis antarctica*가 생산한 CDOM은 빠른 시간 안에 감소하여 광분해 효과를 보이며, 자외선에 민감하게 반응한 반면, 북극종 *Phaeocystis pouchetii*이 생산한 CDOM은 광반응성에서 덜 민감할 뿐 아니라, 광보호 효과가 있는 자외선 차단 효과를 보이기 때문에, 수중 생태계의 초기 단계의 생물을 보호하고, 유색 용존 유기물을 보존하는 차단막 역할을 할 수 있는 효과를 기대할 수 있음을 보여준다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2020년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Boelen, P., M. K. de Boer, G. W. Kraay, M. J. Veldhuis, and A. G. Buma(2000), UVBR-induced DNA damage in natural marine picoplankton assemblages in the tropical Atlantic Ocean. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 193, pp. 1-9.
- [2] Garcia-Pichel, F.(1994), A model for internal self shading in planktonic organisms and its implications for the usefulness of ultraviolet sunscreens. *Limnology and Oceanography*, Vol. 39, No. 7, pp. 1704-1717.
- [3] Guillard, R. R. and J. H. Ryther(1962), Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* Hustedt, and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran. *Canadian journal of microbiology*, Vol. 8, No. 2, pp. 229-239.
- [4] Ha, S. Y., Y. N. Kim, M. O. Park, S. H. Kang, H. C. Kim, and K. H. Shin(2012), Production of mycosporine-like amino acids of in situ phytoplankton community in Kongsfjorden, Svalbard, Arctic. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Vol. 114, pp. 1-14.
- [5] Helbling, E. W., V. Villafane, M. Ferrario, and O. Holm-Hansen(1992), Impact of natural ultraviolet radiation on rates of photosynthesis and on specific marine phytoplankton species. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 80, No. 1, pp. 89-100.
- [6] Karentz, D., J. E. Cleaver, and D. L. Mitchell(1991), Cell survival characteristics and molecular responses of Antarctic phytoplankton ultraviolet-B radiation. *Journal of Phycology*, Vol. 27, No. 3, pp. 326-341.
- [7] Laurion, I., A. Lami, and R. Sommaruga(2002), Distribution of mycosporine-like amino acids and photoprotective carotenoids among freshwater phytoplankton assemblages. *Aquatic Microbial Ecology*, Vol. 26, No. 3, pp. 283-294.
- [8] Liu, Z., D. P. Häder, and R. Sommaruga(2004), Occurrence of mycosporine-like amino acids (MAAs) in the bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Plankton Research*, Vol. 26, No. 8, pp. 963-966.
- [9] Marchant, H. J., A. T. Davidson, and G. J. Kelly(1991), UV-B protecting compounds in the marine alga *Phaeocystis pouchetii* from Antarctica. *Marine Biology*, Vol. 109, No. 3, pp. 391-395.
- [10] Moeller, R. E., S. Gilroy, C. E. Williamson, G. Grad, and R. Sommaruga(2005), Dietary acquisition of photoprotective compounds (mycosporine like amino acids, carotenoids) and acclimation to ultraviolet radiation in a freshwater copepod. *Limnology and Oceanography*, Vol. 50, No. 2, pp. 427-439.
- [11] Moisan, T. A. and B. G. Mitchell(2001), UV absorption by mycosporine-like amino acids in *Phaeocystis antarctica* Karsten induced by photosynthetically available radiation. *Marine Biology*, Vol. 138, No. 1, pp. 217-227.
- [12] Nelson, N. B., D. A. Siegel, C. A. Carlson, and C. M. Swan(2010), Tracing global biogeochemical cycles and meridional overturning circulation using chromophoric dissolved organic matter. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, L03610.
- [13] Ortega-Retuerta, E., T. K. Frazer, C. M. Duarte, S. Ruiz-Halpern, A. Tovar-Sánchez, J. M. Arrieta, and I. Rechea(2009), Biogeneration of chromophoric dissolved organic matter by bacteria and krill in the Southern Ocean. *Limnology and Oceanography*, Vol. 54, No. 6, pp. 1941-1950.
- [14] Romera-Castillo, C., H. Sarmento, X. A. Alvarez-Salgado, J. M. Gasol, and C. Marraséa(2010), Production of chromophoric dissolved organic matter by marine phytoplankton. *Limnology*

and Oceanography, Vol. 55, No. 1, pp. 446-454.

- [15] Singh, N., V. Kamath, K. Narasimhamurthy, and R. S. Rajini(2008), Protective effect of potato peel extract against carbon tetrachloride-induced liver injury in rats. *Environmental toxicology and pharmacology*, Vol. 26, No. 2, pp. 241-246.
- [16] Smith, R. C., B. B. Prezelin, K. E. A. Baker, R. R. Bidigare, N. P. Boucher, T. Coley, and K. J. Waters(1992), Ozone depletion: ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters. *Science*, Vol. 255, pp. 952-959.
- [17] 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, No. 1-4, pp. 108-118.
- [18] Vernet, M. and K. Whitehead(1996), Release of ultraviolet-absorbing compounds by the red-tide dinoflagellate *Lingulodinium polyedra*. *Marine Biology*, Vol. 127, No. 1, pp. 35-44.

Received : 2022. 06. 07.

Revised : 2022. 07. 14. (1st)

: 2022. 07. 22. (2nd)

Accepted : 2022. 08. 29.