

중파 자외선에 노출된 남극 구조 *Chaetoceros neogracile*와 *Stellarima microtrias*의 성장과 질산염 흡수량의 변화

강재신* · 강성호 · 이윤호 · 심정희 · 이상훈

(한국해양연구원, 극지연구본부)

UV-B Effects on Growth and Nitrate Dynamics in Antarctic Marine Diatoms *Chaetoceros neogracile* and *Stellarima microtrias*

*Jae-Shin Kang, Sung-Ho Kang, Youn-Ho Lee, Jung-Hee Shim
and Sang-Hoon Lee

Polar Sciences Laboratory, Korea Ocean Research and
Development Institute, P.O. Box 29, Ansan 425-600, Korea

Two isolated Antarctic marine diatoms, *Chaetoceros neogracile* VanLandingham and *Stellarima microtrias* (Ehrenberg) Hasle and Sims were examined to show changes of growth and uptake rate of nitrate due to UV-B irradiance. Chlorophyll (chl) *a* concentration was regarded as the growth index of diatom. The diatoms were treated with UV-B radiation and cultured for 4 days under cool-white fluorescent light without UV-B radiation. Two levels of UV-B exposures were applied: 1 and 6 W m⁻². Durations of UV-B treatment were 20, 40 and 60 minutes under 6 W m⁻² and 1, 2, 3, 4 and 5 hrs under 1 W m⁻². The control groups were cultured at the same time without UV-B radiation. The growth rates of two diatoms decreased under 1 and 6 W m⁻² UV-B irradiances than that of control group. After 4 days, chl *a* concentrations of *C. neogracile* were increased more than 4 times from 133 μg·l⁻¹ to 632 μg·l⁻¹ in control group. However, the concentration of experimental groups under 1 W m⁻² UV-B were only increased from 139 μg·l⁻¹ to 421 μg·l⁻¹ during one hour and the chl *a* concentrations were decreased from 144 μg·l⁻¹ to 108 μg·l⁻¹ during five hour. Growth of diatom dramatically more decreased under 6 W m⁻² UV-B than 1 W m⁻² UV-B. The chl *a* concentration of experimental groups under 6 W m⁻² UV-B for one hour was only increased from 111 μg·l⁻¹ to 122 μg·l⁻¹. In the case of *S. microtrias* showed also similar pattern to *C. neogracile* by UV-B radiation. The uptake rates of nitrate by the two strains were decreased abruptly under 6 W m⁻² UV-B irradiances. When two strains were treated under 1 and 6 W m⁻² UV-B during one hour, the strains were only continued growth and uptake of nitrate under 1 W m⁻² UV-B. This experimental evidence shows that exposure to UV-B radiation especially to high irradiance of UV-B decreases diatom survival and causes lower decrease of nutrient concentrations by microalgae in Antarctic water. Furthermore, evidence suggests that microalgal communities confined to near-surface waters in Antarctica will be harmed by increased UV-B radiation, thereby altering the dynamics of Antarctic marine ecosystems.

Key Words: Antarctic diatoms, *Chaetoceros neogracile*, chlorophyll *a*, growth and nitrate dynamics, *Stellarima microtrias*, UV-B

서 론

남극 상공에 오존홀이 발견된 이후 중파자외선(UV-B, 280-320 nm)이 미치는 생태학적 역할에 대하여 관심이 집중되어왔고, 이에 따라 과학적으로 의미있는 결과들이 제시되

어 왔다(Holm-Hansen *et al.* 1993; Vincent and Roy 1993; Karentz *et al.* 1994; Weiler and Penhale 1994). 미세조류의 경우, 중파자외선은 미세조류의 광합성을 억제한다는 결과들이 제시되었고(Smith *et al.* 1992; Helbling *et al.* 1992, 1994; Cullen and Neale 1994; Kang *et al.* 1999), 사망률의 증가(Karentz 1994; Häder *et al.* 1995), DNA와 세포분열에 미치는 영향(Gieskes and Buma 1997; Buma *et al.* 2000), Mycosporine-like Amino Acids(MAAs) 합성의 증

*Corresponding author (jskang@kordi.re.kr)

가(Karentz 1994) 등의 연구결과도 제시되었다. 이러한 중파자외선은 해양생태계에서 미세조류이외의 비광합성 생물인 박테리아나(Karentz 1994) 원생생물의 성장에 유해한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Martini *et al.* 1997).

남극의 경우, 자외선 조사량의 증가와 미세조류의 생태, 생리 변화는 다른 지역에 비해 중요한 의미를 갖는다. 빛을 이용하여 광합성을 하는 미세조류의 자외선에 대한 반응은 남극이나 적도지방이나 다를 바 없다. 하지만 남극에는 매년 봄-여름 사이에 남극상공의 오존층이 파괴되어 오존량이 급격히 감소되는(~100 DU) 지역이 매우 광대하게 나타난다(Stolarski *et al.* 1986; Stolarski *et al.* 1992). 오존층의 파괴는 곧 남극지역에서 서식하는 생물체에 유해한 영향을 주는 중파자외선(UV-B)의 조사량의 증가를 의미한다. 남극해의 미세조류는 수온 상승과 일조량의 증가 등으로 오존홀이 형성되는 시기인 봄-여름에 대발생된다(Smith and Nelson 1986). 남극에서 미세조류가 대량 증식하는 시기와 유해 자외선의 조사량이 증가하는 시기가 서로 같기 때문에 유해 자외선이 해양생태계에 미치는 영향이 다른 지역에 비해 매우 심각할 것으로 생각된다.

해양생태계에 미치는 자외선의 영향에 대한 연구가 남극에서 시작될 무렵 여러 학자들은 남극해 일차생산력은 중파자외선으로 인해 감소하지 않는다고 생각하였다(Hobson and Hartley 1983; Gala and Giesy 1991). 그러나 중파자외선이 남극산 미세조류의 세포분열속도인 성장률에 영향을 주어 궁극적으로 남극해양생태계 미세조류 군집구조에 영향을 준다는 가설과(Karentz 1989) 자외선이 해수의 상층부에 5-16%의 일차생산력의 감소를 일으킨다는 연구 결과가 제시되었다(Boucher and Prezelin 1993). 현실적으로 단기간의 현장 조사 또는 배양실험을 통해서 자외선이 남극해양생태계에 미치는 영향을 정량적으로 나타내는데는 어려움이 많다. 남극에서 중파자외선은 봄에 조사량이 급증하며 이러한 현상은 매년 반복되고 있다. 지금까지의 자료들은 대부분 조사 당해의 결과를 이용하여 그 영향을 해석하여 왔다. 따라서 지속적으로 중파자외선 조사량의 증감이 반복되는 남극생태계 내에 개체군은 지난 수십 년간 종조성, 생물량 등의 변화가 유도되었을 것이며 이와같은 연구는 아직까지 매우 미비한 형편이다. 이러한 원인 중 하나는 과거의 기록이 매우 부족하기 때문이며, 현재의 자료만으로는 미래 남극해양생태계의 변화를 예측하는데 어려움이 있다.

이 연구는 1) 중파자외선이 규조의 성장과 영양염 흡수량 변화에 미치는 영향을 조사하고, 2) 중파자외선의 세기와 노출 시간을 달리하였을 때 규조의 성장에 미치는 영향을 비교하여 실제 남극해양생태계에 일어날 수 있는 생물량의 감소를 예측해보는데 그 목적이 있다. 실험대상은 실제 남극해에서 서식하는 규조 두 종(*Chaetoceros neogracile* VanLanding-

ham, *Stellarima microtrias* (Ehrenberg) Hasle and Sims)를 이용하였다.

재료와 방법

1998년 10월부터 12월 사이에 남극 킹조지섬 맥스웰만 세 종기지 주변 해역에서 서식하는 미세조류를 단종 배양하였다. 세종기지 주변 해역은 브랜스필드 해협과 연결된 맥스웰만에 위치하며, 조류의 방향 및 바람의 세기에 따라 연중 외양종의 유입이 많은 곳이나 여름철에는 대형 해조류 및 암반에 부착하여 서식하는 부착성 미세조류의 증식이 활발한 특성을 갖는다. 배양 종 중 두 종(*Chaetoceros neogracile*, *Stellarima microtrias*)을 실험에 이용하였다. 두 종은 해빙 주변이나 외양에서 쉽게 관찰되는 종으로 연안에서는 우점하는 규조는 아니지만 부착성 규조가 증가하지 않은 늦은 봄철에 나타나는 종이다.

미세조류의 배양을 위하여 두 종을 비롯한 다른 종들을 현장에서 채집된 즉시 냉암소에 보관하여 실험실로 운반하였다. 시료는 곧 희석법이나 현미경을 이용한 미세관 분리법으로 단일종으로 분리되었다. 분리된 단일 세포들을 우선 F/10 배지와 F/5 배지에서 세척하였다. 장기배양을 위하여 121°C, 1.5기압에서 20분간 멸균된 F/2 배지(Guillard and Ryther 1962)를 이용하였다. 모든 종들은 동일한 조건인 1.5°C incubator에서 배양되었다. 광조건은 남극 하계기간의 특성에 맞추어 24시간 연속광이었다. 예비 실험에서 *Chaetoceros neogracile*과 *Stellarima microtrias*의 10종류의 strain을 배양하였다. 각 strain의 성장률을 측정하고 상태가 가장 양호한 strain인 *Chaetoceros neogracile*(98110C), *Stellarima microtrias*(981205S)를 실험에 이용하였다.

자외선은 UV-B 파장의 lamp(Spectronics Corp, BLE-1T 158과 Philips TL20)를 이용하였다. 자외선 세기는 1 W m⁻²와 6 W m⁻²로 맞추어 처리하였다. 새로 접종한 세포의 성장이 지수기(exponential phase)에 달했을 때 계대 배양하여, 저광도에서는 1, 2, 3, 4, 5시간까지 고광도에서는 20, 40, 60분까지 자외선에 노출시킨 뒤 시료를 4일간 배양하였다.

규조의 엽록소 a(chl a)양의 변화를 성장지수로 활용하였다. Chl a의 측정은 Extraction Method를 이용하였다(Arar and Collins 1997). 각 실험구에서 10 ml씩 채수한 시료를 25mm GF/F 여과지로 여과한 뒤 여과지를 90% Aceton에 넣어 24시간 냉암소에 방치하였다. Chl a 절대값은 다음날 Turner Design Fluorometer(Model 10-005R)로 측정되었다.

규조의 질산염 흡수량은 Lachat AutoAnalyzer로 측정하였다. 25 mm GF/F 여과지로 여과한 여과액은 Auto-

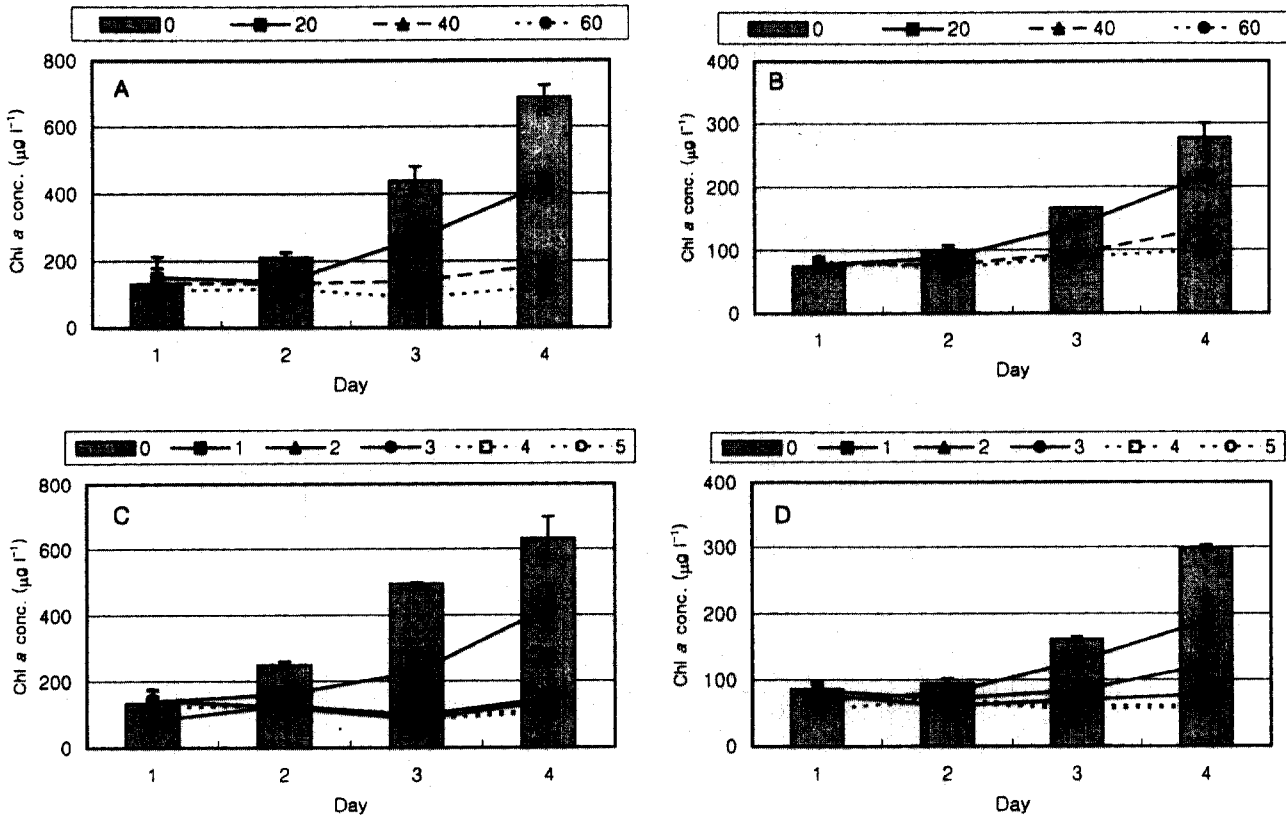


Fig. 1. Changes in cellular chlorophyll *a* concentration of *Chaetoceros neogracile* (98110C) and *Stellarima microtrias* (981205S) during exposure to high (6 W m^{-2}) and low (1 W m^{-2}) UV-B irradiances. A: High-98110C, B: High-981205S, C: Low-98110C, D: Low-981205S. A-B: 0-control, 20, 40, 60-minute, C-D: 0-control, 1, 2, 3, 4, 5-hour.

Analyzer로 측정되기까지 -70°C 냉동고에서 보관되었다. 자외선에 노출되지 않은 대조군은 자외선을 제외한 모든 조건이 동일한 상태에서 배양되었다. 모든 실험은 두번 반복 실험하였다.

결 과

저광도의 중파 자외선으로 장시간 조사한 실험

중파자외선을 1 W m^{-2} 에서 한시간 간격으로 조사 시간을 증가시켰을 때, chl *a*의 양은 현저하게 감소하였다. 중파자외선에 노출되지 않은 *C. neogracile*(98110C) 대조군의 chl *a* 양은 $133 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 에서 $632 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 4일만에 4배 이상 증가하였다(Fig. 1C). 중파자외선 1 W m^{-2} 에 1 시간 동안 노출된 실험군의 chl *a* 양은 $139 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 에서 $421 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 3배 정도로 증가하여 그 증가폭이 대조군에 비해 작았고, 5시간 동안 노출된 실험군에서는 chl *a* 양이 $144 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 에서 4일 후 $108 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 오히려 감소하였다. 이러한 경향은 *S. microtrias* (981205S)에서도 유사하게 나타났다(Fig. 1D). *C. neogracile* (98110C)에 비해 성장률이 다소 낮은 *S. microtrias* (981205S) 대조군의 chl *a* 양은 4일 배양기간 동안 $86 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$

에서 $299 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 3배 이상 증가하였다. 중파자외선에 1시간 동안 노출된 *S. microtrias*(981205S) 실험군의 chl *a* 양은 $69 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 에서 $188 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 증가폭이 대조군에 비해 작았고, 5시간 동안 노출된 실험군에서는 $42 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 에서 $36 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 오히려 감소하였다.

또한 자외선에 노출된 실험군에 흡수된 질산염의 농도는 대조군에 비해 그 감소폭이 뚜렷이 작았다(Fig. 2). *C. neogracile*(98110C) 대조군에서 질산염 농도는 $1,559 \mu\text{M}$ 에서 4일 뒤 $1,202 \mu\text{M}$ 로 감소하였다. 중파자외선에 1시간 동안 노출된 실험군의 질산염 농도는 $1,540 \mu\text{M}$ 에서 $1,329 \mu\text{M}$ 로 감소폭이 작았고, 5시간 노출된 실험군의 질산염 농도는 배양 첫날에 비해 거의 변화하지 않았다. *S. microtrias* (981205S)의 대조군도 4일 배양 뒤 질산염 농도가 $1,605 \mu\text{M}$ 에서 $1,507 \mu\text{M}$ 로 감소하였다. 중파자외선에 1시간 동안 노출된 실험군은 $1,604 \mu\text{M}$ 에서 $1,540 \mu\text{M}$ 로 감소폭이 작았으며, 5시간 동안 노출된 실험구에서는 질산염의 농도가 거의 감소하지 않았다.

고광도의 중파자외선으로 단시간 조사한 경우

6 W m^{-2} 중파자외선을 한 시간 동안 조사하였을 때, 1 W

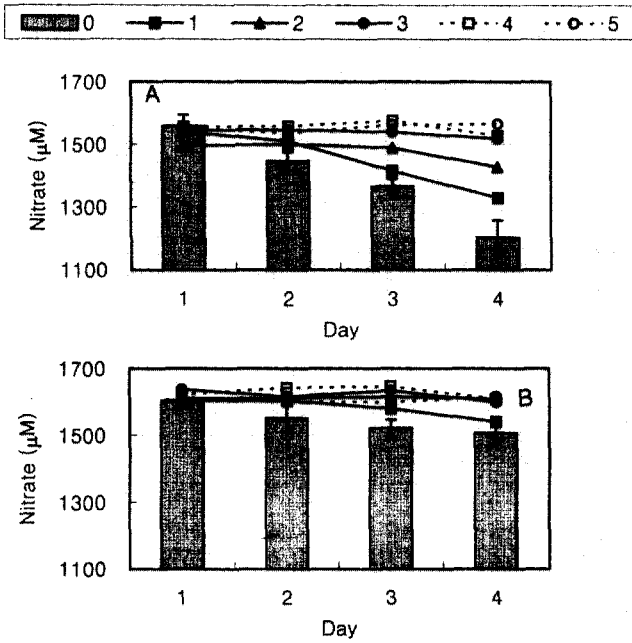


Fig. 2. Changes of nitrate concentration of *Chaetoceros neogracile* (98111C) and *Stellarima microtrias* (981205S) during exposure to low UV-B irradiances (1 W m^{-2}). A: 98111C, B: 981205S. (0-control, 1, 2, 3, 4, 5-hour).

m^{-2} 중파자외선을 한시간 조사하였을 때 보다 chl a의 양이 현저하게 감소되었다. *C. neogracile*(98110C) 대조군의 chl a 양은 $130 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 에서 $687 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 로 4일만에 5배 이상 증가하였으나, 6 W m^{-2} 중파자외선에 20분 동안 노출시킨 실험군의 chl a 양은 $150 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 에서 $427 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 로 증가하여 그 증가폭이 크게 작았다(Fig. 1A). 6 W m^{-2} 중파자외선에 1시간 동안 노출된 실험군의 chl a 양은 $111 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 에서 $122 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 로 증가폭이 매우 낮았다. *S. microtrias* (981205S)도 이와 유사한 경향이 관찰되어, 4일 배양기간 동안 대조군의 chl a 양은 $75 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 에서 $277 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 로 3배 이상 증가한 반면, 1시간 동안 노출된 실험군에서는 $83 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 에서 $99 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 로 매우 미약하게 증가하였다(Fig. 1B).

6 W m^{-2} 중파자외선은 2종 규조의 질산염 흡수를 저해하였다(Fig. 3). *C. neogracile*(98110C) 대조군의 질산염 농도는 $1,522 \mu\text{M}$ 에서 $913 \mu\text{M}$ 로 배양 4일 뒤 현저하게 감소하였으나, 6 W m^{-2} 중파자외선이 60분간 쬐어진 실험구의 질산염 농도는 $1,588 \mu\text{M}$ 에서 $1,460 \mu\text{M}$ 로 소량 감소하였다. 6 W m^{-2} 중파자외선에 20분 또는 40분 동안 노출된 2종의 질산염 흡수량은 60분간 쬐어진 실험구에 비해 크게 감소하였다. *S. microtrias* (981205S)도 유사한 경향을 보여 대조군에 비해 6 W m^{-2} 중파자외선에 노출된 실험구의 질산염의 농도가 소폭 감소하였다.

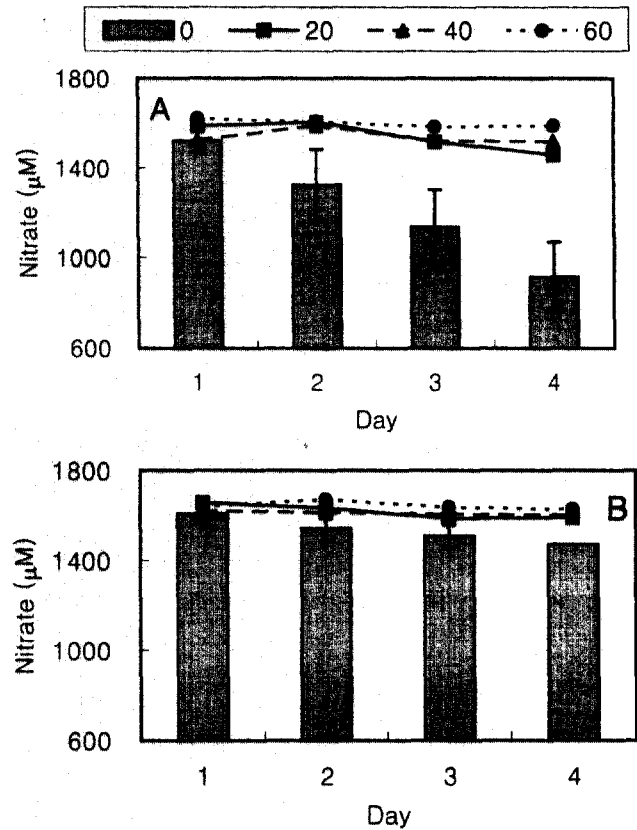


Fig. 3. Changes of nitrate concentration of *Chaetoceros neogracile* (98110C) and *Stellarima microtrias* (981205S) during exposure to high UV-B irradiances (6 W m^{-2}). A: 98111C, B: 981205S. (0-control, 20, 40, 60-minute).

고 찰

중파자외선은 규조류 뿐만 아니라 미소, 극미소플랑크톤인 coccolithophore와 cyanobacteria의 성장도 저해한다 (Vincent and Quesada 1994; Buma et al. 1995; Buma et al. 2000). 특히 외해에 서식하는 식물플랑크톤 중 중요한 구성원인 Coccolithophore *Emiliania huxleyi*(Lohm.) Hay et Miller는 자외선 조사 강도가 자연광 수준에서도 매우 민감하여 자외선에 노출되었을 때 50% 성장률 감소가 관찰되었다(Buma et al. 2000). 하지만 Helbling et al.(1992)에 의하면, 미소조류(nano-sized phytoplankton)에 비해 미세조류(micro-sized phytoplankton)가 자외선에 대해 더욱 민감하며, 열대지방에 서식하는 식물플랑크톤에 비해 남극해에 서식하는 식물플랑크톤이 자외선에 더욱 민감하다. 따라서 남극 연안생태계는 일차생산자가 bloom하는 여름철에 미세조류인 규조의 상대적 우점도가 높기 때문에(Kang et al. 2002) 자외선에 의한 해양생태계 변화가 더욱 심각할 수 있다. 본 실험에 이용된 남극산 규조 *Chaetoceros neogracile*

과 *Stellarima microtrias*도 자외선에 노출되었을 때 성장률이 낮아졌다(Fig. 1). 아직까지 자연상태에서 중파자외선 조사량이 증가할 때 이 두 종의 생물량이 감소한다는 보고는 없지만 이 두 종의 생물량은 늦은 봄(10-11월), 세종기지 주변 해역에서 증가하기 때문에(Kang 2002), 그 시기가 중파자외선 조사량이 증가하는 시기(9-11월, KORDI, 1997)와 일치하게 된다. 이러한 시간상의 일치에 근거하여 통해 두 가설을 생각해 볼 수 있다. 첫째, 위 두 종의 생물량은 자외선 조사량이 지금과 같이 증가하지 않은 시기에 더 높았다. 둘째, 두 종은 다른 종에 비해 중파자외선에 대해 민감도가 낮기 때문에 중파자외선 조사량이 증가하는 봄철에 생물량도 같이 증가할 수 있다. 하지만 안타깝게도 과거자료의 부족으로 이러한 가설을 입증할만한 증거 자료는 없다. 하지만 우리는 이러한 의문이 현재 지속되는 모니터링 연구들을 통해 답을 얻을 수 있다고 생각한다. 한국해양연구원은 1996년 이후 세종기지 주변 해역에 서식하는 미세조류의 생물량을 계속해서 모니터링하고 있다. 이 자료는 1988년 이후 모니터링되는 기상자료와 함께 중파자외선이 미세조류 생물량의 증감 및 종조성의 변화에 미치는 영향을 밝히는데 좋은 기초자료가 될 것이다.

한편, 저광도 즉 1 W m^{-2} 중파자외선에 5시간 동안 노출된 두 종은 모두 4일 배양 뒤 성장하지 않았다(Fig. 1). 중파자외선에 노출된 균주를 흰색광 밑에서 배양하는 것은 광재활성기작을 통해 손상된 DNA의 회복을 유도하는 것이다. Karentz et al.(1991)에 의하면 자외선에 노출된 균주를 흰색광과 황색광 밑에서 배양하였을 때, 흰색광에서 성장이 뚜렷하게 높았다. 광재활성기작이 일어나지 않게 배양을 하면 세포의 광합성은 지속되나 더 이상 세포분열 및 DNA 복제가 일어나지 않는다(Weinert and Hartwell 1989). 따라서 저광도 중파자외선에 5시간 노출된 2종이 백색광 밑에서 4일간 배양 뒤 거의 성장하지 않은 것은 중파자외선에 의해 종의 거의 사멸하였다는 것을 의미한다. 즉, 고광도 중파자외선에 1시간 노출된 실험구와 마찬가지로 저광도 자외선에 5시간 이상 쬐어주었을 때 2종은 모두 사멸하였다. 따라서 저광도의 중파자외선일지라도 장시간 쬐어지면 남극해 미세조류의 생물량을 낮게 하는 요인이 될 것이다.

고광도 중파자외선은 저광도에 비해 짧은 시간 동안 유해한 영향이 더 크다. *C. neograticile*(98110C)와 *S. microtrias*(981205S) 두 균주를 저광도(1 W m^{-2})와 고광도(6 W m^{-2})에서 한시간 동안 노출시켰을 때 두 종 모두 저광도에서 높은 성장률을 보였다(Fig. 4). 고광도 중파자외선은 세포내 손상된 DNA가 정상으로 돌아가는 회복률을 급격히 떨어뜨린다. Buma et al.(2000)은 Coccolithopore인 *Emiliania huxleyia*를 이용하여 고광도의 중파자외선에 노출된 세포의 DNA 회복률이 저광도의 중파자외선에 노출된 세포에 비해

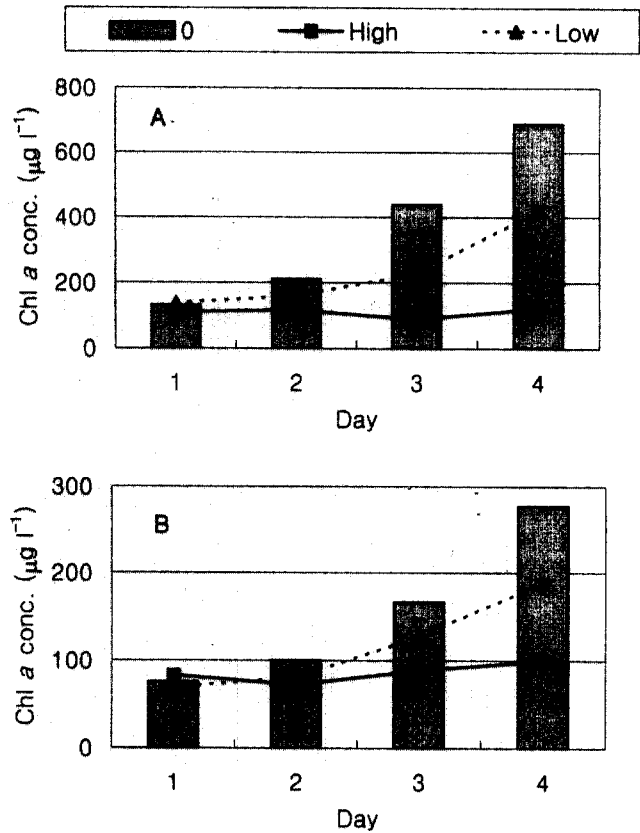


Fig. 4. Changes in cellular chlorophyll a concentration of *Chaetoceros neograticile* (98110C) and *Stellarima microtrias* (981205S) during one hour exposure to high (6 W m^{-2}) and low (1 W m^{-2}) UV-B irradiances. A: 98110C, B: 981205S. (0-control).

급감한다고 밝혔다. DNA 회복률의 감소는 DNA 복제 및 세포분열의 감소를 의미하므로 곧 성장률이 낮아진다. 따라서 고광도 중파자외선을 한 시간 동안 쬐어주었을 때 성장률은 낮아지게 된다. 남극산 균주 *C. neograticile*과 *S. microtrias*도 고광도 중파자외선에 40분 이상 노출되면 4일동안 백색광 밑에서 배양을 하여도 chl a가 크게 변화하지 않았다(Fig. 1). 즉, 저광도 중파자외선에 비해 고광도 중파자외선이 짧은 시간 동안 남극해양생태계에 더 치명적인 피해를 입힐 수 있다.

한편, 0.1 W m^{-2} 이하의 중파자외선에 노출된 균주 몇 종에서는 뚜렷한 성장률의 증가가 관찰되었다(Karentz 1994). 이러한 경향은 박테리아 균주에서도 나타나며, 0.1 W m^{-2} 이하의 저광도 중파자외선은 DNA 합성 및 세포분열을 촉진시키는 역할을 한다는 가설로 설명되고 있다(Jokiel and York 1984). 1 W m^{-2} 정도의 중파자외선은 균주의 성장을 저해한다. 남극산 균주 *C. neograticile*과 *S. microtrias*도 저광도(1 W m^{-2}) 중파자외선에 한 시간 이상 노출되면 성장이 저해되었다(Fig. 1). 하지만 Helbling et al.(1996)에 의하면,

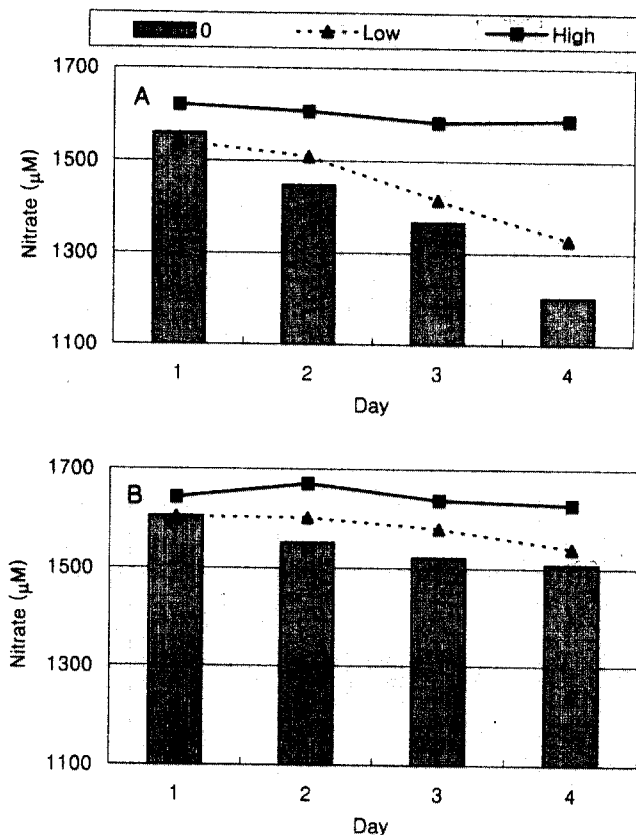


Fig. 5. Changes in nitrate concentration of *Chaetoceros neogracile* (98110C) and *Stellarima microtrias* (981205S) during one hour exposure to high (6 W m^{-2}) and low (1 W m^{-2}) UV-B irradiances. A: 98111C, B: 981205S. (0-control).

저광도 중파자외선 밑에서 지속적으로 규조를 배양할 때 배양 초기 규조의 성장률과 광합성률은 모두 급감하나, 배양 8-12일이 지나면서 광합성률은 통계학적으로 유의하게 자외선이 조사되지 않은 상태로 회복되었다. 이것은 저광도 중파자외선에 노출된 규조 세포내에 MAAs와 같은 자외선 흡수 물질의 합성이 증가되었기 때문이다. Helbling *et al.* (1996)은 위의 결과를 통해 남극지방의 봄-여름 사이에 1 W m^{-2} 이하의 저광도 중파자외선이 지속되는 것은 남극해 미세조류의 생물량을 저해하는 역할을 하지 않는다는 가설을 제안하였다. 즉 저광도 중파자외선은 일시적으로 남극해에 서식하는 미세조류의 광합성률 및 생존률을 저해되나 미세조류는 곧 생체내에 MAAs와 같은 합성물질을 만들면서 정상상태로 회복한다. 본 연구에서는 Helbling *et al.* (1996)의 결과와 같은 현상이 나타나지 않았다. 8-12일 동안 1 W m^{-2} 중파자외선을 쬐어준 Helbling *et al.* (1996)의 실험과는 달리 5시간 동안 쬐어준 실험구에서는 광합성률이 회복되는 현상이 관찰되지 않았다. 따라서 앞으로 저광도 중파자외선에 노출된 시간을 더 늘려 규조에 의한 자외선 방어기작이 나타나

는 시간 및 효율 등에 대한 연구를 수행할 예정이다.

이와 같은 저광도와 고광도의 중파자외선에 대한 규조류의 성장률 감소는 영양염의 흡수에도 영향을 준다. 1 W m^{-2} 자외선에서 남극산 규조 *C. neogracile*을 배양한 배지내의 질산염의 농도는 조사시간이 증가함에 따라 감소율이 뚜렷하게 감소하였다(Fig. 2). 1 W m^{-2} 중파자외선에 1시간 동안 노출한 뒤에도 질산염의 농도는 배양이 지속됨에 따라 꾸준히 감소하는 경향을 보여 자외선에 노출되지 않은 대조군과 같은 패턴을 관찰할 수 있었다(Fig. 5). 하지만 6 W m^{-2} 중파자외선에 1시간 동안 노출된 실험군은 질산염의 흡수가 거의 일어나지 않았다. 남극산 규조 *S. microtrias*도 반복 실험을 통해 편차가 다소 크게 나타났지만, *C. neogracile*과 유사하게 질산염의 농도가 크게 변하지 않았다. 즉, 두 종 모두 저광도 중파자외선에 1시간 노출시키고 백색광 밑에서 배양하면 회복 및 성장을 거쳐 꾸준한 영양염의 흡수가 일어나는 반면, 같은 시간동안 고광도 중파자외선에 노출된 규조는 백색광 밑에서 배양을 지속하였어도 회복률이 매우 낮아 영양염이 거의 흡수되지 않았다.

중파자외선에 대한 민감도는 종에 따라 차이가 있으며, Karentz *et al.* (1993)에 의하면, 세포의 크기와 중파자외선에 대한 DNA 손상량이 서로 유의하게 상관되어있어 같은 분류군내에서 크기가 큰 세포가 자외선에 대한 내성이 크다고 발표하였다. 세종기지 주변에 순수 분리된 세 종 *Thalassiosira antarctica*, *Fragilariopsis cylindrus*, *Chaetoceros neogracile*을 중파자외선에 노출시켰을 때 세포의 크기가 다른 2종에 비해 1-20배 가량 큰 *Thalassiosira antarctica*의 민감도가 낮았다(Kang *et al.* 1999). 자연상태에서도 실험실에서 나타난 결과와 같은 결과가 나타나, Bothwell *et al.* (1993)은 저서성 규조가 우점하는 강가에 중파자외선 조사량이 증가하면 세포의 크기가 큰 종으로 천이가 일어난다고 보고하였다. 한편, 세포의 크기가 $5 \mu\text{m}$ 정도인 *Phaeocystis antarctica*는 자외선에 대한 내성이 높은 종으로 잘 알려져 있다(Marchant *et al.* 1991). 이 종은 비록 크기는 작지만 323 nm에서 높은 흡광도를 보이는 점액질 성분을 분비하여 군체를 형성한다. 점액질 성분에는 자외선 흡수 물질인 MAAs가 함유되어 있어 자외선에 대해 효과적으로 생존한다(Reigger and Robinson 1997; Prezelin *et al.* 1998). 따라서 중파자외선은 생태계에서 종을 선택하고 종구성을 변화하게 하는 하나의 요인이 된다

이상의 결과들은 정리하면, 첫째, 남극산 규조 *Chaetoceros neogracile*과 *Stellarima microtrias*는 모두 중파자외선에 노출되면 성장 및 영양염 흡수량이 감소하였으며, 둘째, 고광도의 중파자외선은 저광도에 비해 짧은 시간 동안 유해한 영향이 더 크게 작용한다고 생각한다. 불과 수십년 전부터 시작된 자외선 연구는 비교적 빠른 시간 동안 많은 연구 결과를

제시하고 있으며, 미래를 예측하기 위한 자료로 이용하고자 노력하고 있다. 이와 같은 연구가 생리, 생태 및 생화학적으로 꾸준히 지속될 때 자외선이 문제가 되기 이전의 과거 현상을 추측하고, 미래에 진행될 자외선에 의한 영향을 예측하기 위한 증거가 마련될 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 PN41201, PP02102 과제의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- Arar E.J. and Collins G.B. 1997. *In vitro* determination of Chlorophyll *a* and Phaeophytin *a* in marine and freshwater algae by fluorescence. National Exposure Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati. 22 pp.
- Boucher N.P. and Prézelin B.B. 1993. Ozone dependent UV effects versus UV-B specific effects on primary production in the Southern Ocean, how and when to consider an UV-spectral correction of direct field measurement? *Antarct. J. U.S.* **27**: 117-119.
- Buma A.G., van Hannen E.J., Veldhuis M.J.W., Roza L. and Gieskes W.W.C. 1995. Monitoring ultraviolet-B induced DNA damage in individual diatom cells by immunofluorescent thymine dimer detection. *J. Phycol.* **31**: 314-321.
- Buma A.G., van Oijen T., van de Poll W., Veldhuis M.J.W., Roza L. and Gieskes W.W.C. 2000. The sensitivity of *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) to ultraviolet-B radiation. *J. Phycol.* **36**: 296-303.
- Cullen J.J. and Neale P.J. 1994. Ultraviolet radiation, ozone depletion, and marine photosynthesis. *Photosyn. Res.* **39**: 303-320.
- Gala W.R. and Giesy J.P. 1991. Effects of ultraviolet radiation on the primary production of natural phytoplankton assemblages in Lake Michigan. *Ecotoxicol. Environ. Safety* **22**: 345-361.
- Gieskes W.W.C. and Buma A.G.J. 1997. UV damage to plant life in a photobiologically dynamic environment: the case of marine phytoplankton. *Plant Ecol.* **128**: 16-25.
- Guillard R.R.L. and Ryther J.H. 1962. Studies of marine planktonic diatoms. I. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* (Clave) Gran. *Com. J. Microbiol.* **8**: 229-239.
- Hader D.P., Worrest R.C., Kumar H.D. and Smith R.C. 1995. Effects of increased solar ultraviolet radiation on aquatic ecosystems. *Ambio* **24**: 174-180.
- Helbling E.W., Chalker B.E., Dunlap W.C., Holm-Hansen O. and Villafañe V.E. 1996. Photoacclimation of Antarctic marine diatoms to solar ultraviolet radiation. *J. Exper. Mar. Biol. Ecol.* **204**: 85-101.
- Helbling E.W., Villafañe V. and Holm-Hansen O. 1994. Effects of ultraviolet radiation on Antarctic marine phytoplankton photosynthesis with particular attention to the influences of mixing. In: Weiler C.S. and Penhale P.A. (eds), *Ultraviolet Radiation and Biological Research in Antarctica*. *Antar. Res. Ser.* **62**: 207-227.
- Helbling E.W., Villafañe V.E., Perratio M. and Holm-Hansen O. 1992. Impact of natural ultraviolet radiation on specific marine phytoplankton species. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **80**: 89-100.
- Hobson L.A. and Hartley F.A. 1983. Ultraviolet irradiance and primary production in a Vancouver Island fjord, British Columbia. *Can. J. Plank. Res.* **5**: 325-331.
- Holm-Hansen O., Lubin D. and Helbling E.W. 1993. UVR and its effects on organisms in the aquatic environment. In: Young A.R., Bjön L.O., Moan J. and Nultsch W. (eds), *Environmental UV Photobiology*. Plenum Press, New York, pp. 379-425.
- Holm-Hansen O., Mitchell B.G. and Vernet M. 1989. Ultraviolet radiation in Antarctic waters: Effects on rates of primary production. *Antarct. J.U.S.* **24**: 177-178.
- Jokiel P.L. and York R.H. 1984. Importance of ultraviolet radiation in photoinhibition of microalgal growth. *Limnol. Oceanogr.* **29**: 192-199.
- Kang J.-S., Kang S.-H. and Lee J.H. 1999. UV Effect of the Antarctic diatoms under culture condition. *Algae* **14**: 117-126.
- Kang J.-S., Kang S.-H., Lee J.H. and S. Lee. 2002. Seasonal variation of microalgal assemblages at a fixed station in King George Island, Antarctica, 1996. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **229**: 19-32.
- Karentz D. 1989. Report on studies related to the ecological implications of ozone depletion on the Antarctic environment. *Antarct. J.U.S.* **24**: 175-176.
- Karentz D. 1994. Ultraviolet tolerance mechanisms in Antarctic marine organisms. In: Weiler C.S. and Penhale P.A. (eds), *Ultraviolet Radiation and Biological Research in Antarctica*. *Antar. Res. Ser.* **62**: 93-110.
- Martini B., Marangoni R., Gioffré D. and Colombetti G. 1997. Effects of UV-B irradiation on the motility and photomotility of the marine ciliate *Fabrea salina*. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.* **39**: 197-203.
- Marchant H.J., Davidson A.T. and Kelly G.J. 1991. UV-B protecting pigments in the marine alga *Phaeocystis pouchetii* from Antarctica. *Mar. Biol.* **109**: 391-395.
- Prezelin B.B., Moline M.A. and Matlick H.A. 1998. Icecolors '93: Spectral UV radiation effects on Antarctic frazil ice algae. In: Lizotte M.P. and Arrigo K.R. (eds), *Antarctic sea ice. Biological processes, interactions and variability*. *Antarctic. Res. Ser.* **73**: 45-83.
- Riegger L. and Robinson D. 1997. Photoinduction of UV-absorbing compounds in Antarctic diatoms and *Phaeocystis antarctica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **160**: 13-25.
- Smith R.C. and Nelson D.M. 1986. Importance of ice-edge phytoplankton production in the Southern Ocean. *Bioscience* **36**: 251-257.
- Smith R.C., Prezelin B.B., Baker K.S., Bidigare R.R., Boucher N.P., Coley T., Karentz D., Macintyre S., Matlick H.A.,

- Menzies D., Ondrus M., Wan Z. and Waters K.J. 1992. Ozone depletion: Ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters. *Science* **255**: 952-959.
- Stolarski R.S., Kruenger A.J., Schoeberl M.R., McPeters R.D., Newman P.A. and Alpert J.C. 1986. Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. *Nature* **322**: 808-811.
- Stolarski R.S., Bojkov R., Bishop L., Zerefos C., Staehelin J. and Zawondy J. 1992. Measure trends in stratospheric ozone, *Science* **256**: 342-349.
- Veth C. 1991. The evolution of the upper water layer in the marginal ice zone, austral spring 1988, Scotia-Weddell Sea. *J. Mar. Syst.* **2**: 451-464.
- Vincent W.F. and Roy S. 1993. Solar ultraviolet-B radiation and aquatic primary production: damage, protection and recovery. *Environ. Rev.* **1**: 1-12.
- Weiler S. and Penhale P.A. 1994. Ultraviolet radiation in Antarctica: measurements and biological effects. *Antarct. Res. Ser.* **62**: 1-257.

Accepted 26 February 2002