

안정동위원소 및 Diving-PAM을 이용한 남서해안 만호해역 (진도-해남) 김 양식장에서의 일차 생산력

김정배* · 이원찬 · 김형철 · 홍석진

국립수산과학원 어장환경과

An Assessment of Primary Productivity Determined by Stable Isotopes and Diving-PAM in the *Pyropia* Sea Farms of the Manho (Jindo-Haenam) Region on the Southwestern Coast of the Korean Peninsula

Jeong Bae Kim*, Won-Chan Lee, Hyung Chul Kim and Sokjin Hong

Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

Abstract - The effects of water temperature, salinity, water column nutrient contents, and phytoplankton primary productivity on pigment composition and concentration, as well as primary productivity of *Pyropia yezoensis* Ueda purple lavers were studied at the primary cultivation areas in the Manho (Jindo-Haenam) region on the southwestern coast of Korea in March 2014. The water temperature was 9.1~9.6°C, salinity was 32.5~33.1, and transparency was 0.7~1.5 m. The shallow euphotic depth resulted from the high turbidity. Water column dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), and silicate concentrations were 3.59~5.73 μM, 0.16~0.41 μM, and 12.41~13.94 μM, respectively. Chlorophyll *a* (Chl *a*) concentration was 0.51~1.25 μg L⁻¹. Nanoplankton (0.7~20 μm size class) accounted for 58% of the total Chl *a* concentration. Fucoxanthin was the dominant photosynthetic pigment at all sites. Microplankton (20~200 μm size class) accounted for 64% of the total fucoxanthin concentration. The primary productivity of phytoplankton was 57.72 ± 4.67 (51.05~66.71) mg C m⁻² d⁻¹. The nanoplankton (0.7~20 μm size class) accounted for 77% of the total phytoplankton primary productivity. The calculated phytoplankton primary productivity was 11,337 kg C d⁻¹. The primary productivity of *Pyropia* blades was 1,926 ± 192 (1,102~2,597) mg C m⁻² d⁻¹, i.e., calculated as 39,295 kg C d⁻¹. The total primary productivity of phytoplankton and *Pyropia* blades was 50,632 kg C d⁻¹. The primary productivity of *Pyropia* blades was 3.5 times greater than that of phytoplankton in the Manho region on the southwestern coast of Korea.

Key words : stable isotope, diving-PAM, primary productivity, *Pyropia yezoensis*, Manho region

* Corresponding author: Jeong Bae Kim, Tel. 051-720-2521,
Fax. 051-720-2515, E-mail. jbkim347@korea.kr

서 론

생물 자원 중에서 식물플랑크톤은 해양의 일차 생산자로서 역할을 담당하고 있으며 (Chin and Hong 1985; Kang *et al.* 1992; Kim and Lee 1999; Park *et al.* 2001; Min *et al.* 2012), 지구 온난화와 관련된 대기 중의 이산화탄소 저감 생물로도 많은 연구가 진행되고 있다. 해양의 일차 생산자로서 식물플랑크톤이 주된 역할을 담당하고 있지만, 지리적인 조건 및 해양의 특성으로 인하여 일차 생산자의 생산력을 측정하고자 할 경우 자연적인 생산력 및 인위적인 생산력으로 구분할 필요가 있다. 일차 생산력 중에서 자연적인 생산력은 식물플랑크톤에 의한 일차 생산이라고 한다면, 인위적인 생산력은 만호(진도·해남)해양의 경우 김 양식이 활발하게 이루어지는 지역이므로 김 양식에 의한 일차 생산이라고 판단된다 (Kang and Koh 1977; Kim 1996; Hong 2001; Kim *et al.* 2012b). 남서해안에 위치하고 있는 전라남도에는 우리나라에서 가장 많은 양식이 이루어지고 있으며, 청정해역으로 양식의 최적지로 평가받고 있다. 또한, 2013년 기준으로 우리나라에서 김 생산량의 77%인 314,137 M/T를 생산하고 있는 지역으로서, 특히, 만호해역이 다른 지역의 김 양식보다 시설면적 대비 김 생산량이 많은 것으로 알려져 있다 (Ministry of Oceans and fisheries 2014).

식물플랑크톤에 의한 우리나라에서의 일차 생산력에 대한 논문은 “대한해협의 식물플랑크톤의 기초 생산력 (Chin and Hong 1985), 서해 중동부 연안수역과 경기만에서 일차 생산력과 동화 계수에 관한 연구 (Kang *et al.* 1992), 동계 베링 해역의 식물플랑크톤 생산성 (Kim and Lee 1999), 진해만의 식물플랑크톤 I. 광 환경에 따른 광합성 특성과 일차 생산력 (Park *et al.* 2001), 섬진강 하구역의 계절별 일차 생산력 및 식물플랑크톤 색소 조성 변화 (Min *et al.* 2012) 등의 많은 연구가 진행되었으나, 김에 대한 일차 생산력의 측정은 남서해역에서 양식되는 방사무늬김의 diving-PAM에 의한 광합성 특성에 일부 소개되었다 (Kim *et al.* 2012b).

본 연구에서는 대부분의 지역에서 김 양식이 이루어지고 있는 만호해역의 물리·화학적 해양환경 특성, 식물플랑크톤 색소 조성과 농도, 식물플랑크톤 및 방사무늬김에 의한 일차 생산력을 분석하여 본 해역의 생산력의 특성을 고찰하였다.

재료 및 방법

1. 김 양식장의 환경 특성

조사해역은 만호해역의 김 양식장으로서 북부해역의 일

부는 김의 품질 저하로 인하여 수확을 종료한 상태였으나, 수심이 얇은 연안에서는 주로 지주식으로 양식되고, 수심이 깊은 연안에서는 부류식으로 양식되고 있으며 (Kim *et al.* 2012a), 조사는 2014년 3월에 11개 정점에서 수행되었다 (Fig. 1). 김 양식장의 환경 특성 분석은 조사정점 1, 8, 11의 3개 정점에서 수행되었고, 방사무늬김의 광합성 특성은 diving-PAM (Walz, Germany)을 이용하여 조사정점 1~10의 10개 정점에서 측정되었다.

수온, 염분, 용존 산소와 pH는 정점 1, 8, 11에서 표층광의 100%, 50%, 12%, 1% 및 저층의 5개 구간을 설정하여 수질 측정기 (YSI 6920, USA)를 이용하여 측정하였다. 투명도는 투명도판을 수중에서 보이지 않는 깊이까지 내린 다음 천천히 끌어올리면서 투명도판이 보이기 시작하는 수심을 측정하였다.

조사 지역의 해수 중 영양염류, 총 부유 입자 물질 (suspended particulate matter, SPM), 입자 유기물질 (particulate organic matter, POM), 입자 유기 탄소 (particulate organic carbon, POC), 입자 유기 질소 (particulate organic nitrogen, PON), 식물플랑크톤 색소 분석을 위한 시료들을 정점 1, 8, 11의 표층광의 100%, 50%, 12% 및 1%에서 채수하였다. 영양염류 분석을 위한 해수 시료는 GF/F 여과지 (pore size 0.7 μm)를 이용하여 여과하였다. SPM은 450°C에서 4시간 동안 미리 회화시킨 후 사전 무게가 측정된 47 mm GF/F 여과지를 이용하여 500 mL의 해수를 여과한 후 염분을 제거하기 위하여 약 10 mL의 초순수로 3회 반복하여 여과기와 여과지를 세척하였다. POM은 동물플랑크톤이나 크기가 큰 입자물질을 제거하기 위하여 200 μm 의 망목에 여과시킨 후 SPM과 동일한 방법으로 전처리하였다. POC와 PON은 25 mm GF/F 여과지를 이용하여 여과하고 1 N HCl 용액을 첨가하여 무기 탄소를 제거하였다. 또한, 식물플랑크톤 색소 분석을 위하여 47 mm GF/F 여과지에 500 mL의 해수 (동물플랑크톤을 제거하기 위하여 200 μm 의 망목으로 여과)를 여과한 후 GF/F 여과지로 여과된 현장해수로 여과기와 여과지를 세척하였다. 정점 8번 시료의 경우 0.7 μm GF/F 여과지로 여과하면서 0.7~200 μm 범위 (200 μm 망목으로 여과한 해수)와 0.7~20 μm 범위 (20 μm 망목으로 여과한 해수)로 구분하였다. 모든 시료는 현장에서 전처리를 한 후 드라이아이스가 들어있는 아이스박스에 보관하여 실험실로 운반하였다.

해수 중 암모니아질소 (NH_4^+), 질산질소 (NO_3^-), 아질산질소 (NO_2^-), 인산인 (PO_4^{3-})과 규산 규소 ($\text{Si}(\text{OH})_4$)의 영양염류 분석은 영양염 자동분석기 (Bran + Luebbe, Quattro, Germany)를 이용하여 측정하였다 (Parsons *et al.* 1984). SPM은 실험실의 건조기 (105°C)에서 24시간 동안 건조한 후 여과 전후의 무게 차를 이용하여 계산하였다. POM은 실험실의

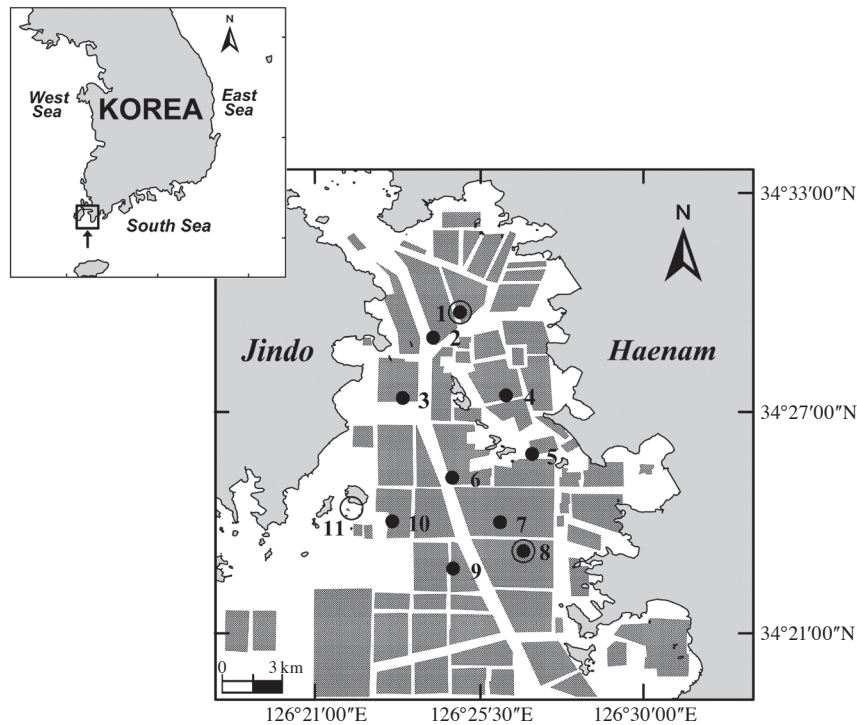


Fig. 1. Seaweed (*Pyropia*) culture area (black area). Observation water primary productivity and environment research (open circle and open circles with closed circle inside (station 1, 8, 11)), *Pyropia* primary production (closed circles and open circles with closed circle inside (station 1-10)) of *Pyropia* sea farms in the Manho region on the southwestern coast of the Korean peninsula.

건조기에서 24시간 동안 건조된 여과지를 실험실의 회화로 (550°C)에서 5시간 동안 회화한 후 무게 차를 이용하여 계산하였다. POC와 PON은 여과지를 실험실의 건조기 (60°C)에서 72시간 동안 건조한 후 CHN 분석기 (Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Italia)를 이용하여 측정 후 계산하였다.

2. 식물플랑크톤 색소 분석

표층 해수의 식물플랑크톤 색소 분석을 위하여 UPLC 시스템 (ultra performance liquid chromatography, waters H-class, Waters, USA)으로 chlorophyll a, b, fucoxanthin, peridinin을 측정하였다. 해수중의 식물플랑크톤 색소분석은 현장에서 여과된 여과지를 10 mL culture tube에 넣고 100% acetone 5 mL을 넣어 내부표준물질 canthaxanthin을 50 μ L 첨가한 뒤 초음파 분쇄를 5분 정도 실시하고, -20°C의 냉암소에서 24시간 추출시킨다 (Wright *et al.* 1991; Jeffrey 1997). 24시간의 추출 기간 중에 분쇄기를 이용하여 여과지를 분쇄하고, 2,000 rpm에서 10분 동안 원심 분리하여, 상등액을 0.45 μ m PTFE filter로 여과하였다. 이 중 1 mL를 취하여 300 μ L의 HPLC grade water와 vial에 넣은 후 잘 혼합하고 UPLC 100 μ L loop에 주입하여 분석하였고, 색소 분석을

Table 1. Condition of UPLC and solvent system in analyzing algal

UPLC: Acquity UPLC H-class systems (Waters Co., USA)
Detector: Acquity UPLC e λ PDA (Waters Co., USA) at 436 nm
Acquity UPLC FLR (Waters Co., USA) at Ex: 432 nm, Em: 650 nm
Column: Acquity UPLC HSS C18
(Water, USA, 100 \times 2.1 mm, particle size: 1.8 μ m)
Solvent A: MeOH 80%, Ammonium Acetate (0.5 M) 20%
Solvent B: Acetonitrile 87.5%, H ₂ O 12.5%
Solvent C: Ethyl Acetate 100%
Flow rate: 0.35 mL min ⁻¹

위한 용매 system은 Park *et al.* (2001)의 조건과 동일하였다 (Table 1).

3. 일차 생산력

1) 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력

식물플랑크톤에 의한 수주 (water column)의 일차 생산력 (primary productivity)은 NaH¹³CO₃의 흡수 실험으로 측정하였다. 유광층 내에서의 생산력을 측정하기 위해 필요한 소광 계수 (extinction coefficient)는 식 $E = 1.7/Z_{sd}$ (Z_{sd} : Secchi disk 수심, Poole and Atkins 1929)으로 산출했으며, 여러 광 조건에 대한 깊이는 Beer의 법칙에 따라 계산하였다.

$$I_0/I_z = \exp(-EZ)$$

I_0 : 표층광도, I_z : 수심 z 에서의 광도, E : 소광계수, Z : 수심

배양을 위한 해수시료는 Niskin 채수기를 이용하여 표층 광량의 약 100%, 50%, 12% 및 1%에 상응하는 수심에서 채수하였다. 각각의 해수를 200 μm sieve에 여과하여 흑색 필터(Lee filter®, Andover, England)를 이용하여 입사광에 대해 100%, 50%, 12% 및 1%의 소상조건에 맞춰 제작된 1,000 mL의 둥근 polycarbonate bottle (Nalgene, USA)에 분취하였다. 배양 전 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ (98 atom %; ISOTEC)의 농도는 해수 중 농도의 약 10% 정도가 되도록 주입하였다. 배양은 표층수가 흐르는 배양수조와 냉각기로 표층광량의 30%에 해당하는 수심의 온도로 조절된 배양수조에서 3~4시간 동안 자연광 하에서 행하였다. 배양 후, 해수시료는 450°C에서 4시간 동안 회화하여 유기물을 제거한 직경 25 mm GF/F 여과지에 여과압력을 70 mmHg 이하로 유지하여 여과하였다. 여과 시료는 알루미늄 호일에 싸서 드라이아이스가 들어있는 아이스박스에 보관하여 실험실로 운반한 후 60°C에서 건조하여 안정동위원소 분석을 통해 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 를 측정하였다. 탄소 섭취율의 계산은 아래의 계산식을 이용하였다(Hama *et al.* 1983; JGOFS 1994).

$$\text{Carbon uptake } (\mu\text{g C L}^{-1} \text{ t}^{-1}) = \Delta\text{C}/t \\ = \{C \cdot (\text{ais} - \text{ans})\} / \{t \cdot (\text{aic} - \text{ans})\}$$

t : 배양시간(hours)

$$\text{ais} \cdot C = \text{ans} (C - \Delta\text{C}) + \text{aic} \cdot \Delta\text{C}$$

ais : 배양 시료의 ^{13}C atom %,

C : 입자유기탄소(POC),

ans : 자연상에 존재하는 ^{13}C atom %

ΔC : 배양시간 동안 증가한 POC

$$= C \cdot [(\text{ais} - \text{ans}) + (\text{aic} - \text{ans})]$$

aic : 총 무기탄소에서 ^{13}C atom % (1.1 atom %)

$$^{13}\text{C atom \%} = 100 \cdot ^{13}\text{C}/(^{12}\text{C} + ^{13}\text{C})$$

일일 생산량은 하루 일조량과 배양시간 동안의 일조량 비를 이용하여 계산하였으며, 각 수층에서 측정한 일차 생산력 값들은 1% 광투과 수심까지 적분하였다.

2) 방사무늬김에 의한 일차 생산력

만호해역에서는 북부 지역을 제외하면 주로 방사무늬김 양식이 많이 이루어지고 있으므로 방사무늬김만을 대상으로 일차 생산력을 산정하였다(Kim *et al.* 2012a). 일반적으로 해수 내의 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력을 구하는 방식과는 달리 방사무늬김에 의한 일차 생산력은 diving-PAM을 이용하여 측정하였다. 김 엽체를 dark leaf clip으로 10분 동안

암 적용시켜 diving-PAM (Walz, Germany)을 이용하여 광화학 양자 수율(photochemical quantum yield)을 측정하였고, 전자 전달률(electron transport rate, ETR)은 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다(Ralph *et al.* 1998; Schreiber 2004).

$\text{ETR} = \text{quantum yield } ((F'm - F)/F'm) * \text{PAR} * 0.5 * \text{ETR-factor}$, 방사무늬김 엽체의 엽록체에서 흡수된 빛을 상대적으로 이용하였으므로 이하에서는 상대 전자 전달률(rETR: relative electron transport rate)로 표현되며, 상대 전자 전달률은 단위 엽록소당 전자 전달률로 잠재적인 광합성 능력을 의미한다(Choi and Kim 2005).

전자 전달을 위한 포화광량(E_k)은 $E_k = r\text{ETR}_{\text{max}}/\alpha$ 로써 계산되며, 광합성 반응은 diving-PAM의 빛 보정 기능 프로그램에 의해 내부 할로겐 광원으로 부터 사전에 인식된 광량(PAR, 0, 20, 78, 220, 420, 667, 950, 1200, 1450 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 범위에서 측정하였다. 현장에서 채집한 방사무늬김 시료는 엽체의 중앙에서 dark leaf clip을 이용하여 각 정점당 12회씩 측정하여 평균값을 사용하였다(Kim *et al.* 2012b).

식물에 의한 광합성 반응식에 의거하여 이론적으로 4 $\mu\text{mol electrons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 는 1 $\mu\text{mol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 가 발생하는데($\text{O}_2/\text{ETR} = 0.25$), Beer *et al.* (2000)은 파래에 대하여 평균 몰 O_2/ETR 비는 0.249 ± 0.044 를 발표하였다. 본 연구에서는 일반적으로 통용되고 있는 이론적인 값인 $\text{O}_2/\text{ETR} = 0.25$ 를 사용하였고, Shim *et al.* (2014)의 낙동강 하구 방사무늬김의 영양염과 이산화탄소 흡수율 정밀 평가를 통한 양식해역의 질소와 탄소 요구량 산정에서 김에 의한 용존 산소 생산율과 무기 탄소 흡수율은 높은 상관관계($r^2 = 0.57$)로 두 성분이 상대 성분비에 대해 간접적인 지표가 될 수 있다고 하였으므로 방사무늬김의 무기탄소 흡수비율과 용존 산소 생산비율인 약 C : N : P : $\text{O}_2 = 106 : 3.0 : 0.2 : 83.7$ 을 바탕으로 방사무늬김의 일차 생산력을 계산하였다.

결 과

1. 김 양식장의 환경 특성

전라남도에서 김 양식 생산량이 많은 만호해역의 면적은 196,412,492 m^2 이고, 김 양식 시설 배치도를 통한 책당 시설(2.2 m × 40 m)량에 의한 면적을 계산하면 20,401,480 m^2 로서 조사 지역을 포함하는 넓은 지역에서 김 양식이 이루어진다(Fig. 1).

표층광의 100%에서 1%까지의 깊이는 정점 1(수심 12.0

m)에서는 표층에서 1.9 m, 정점 8(수심 9.5 m)에서는 표층에서 3.3 m, 정점 11(수심 10.5 m)에서는 표층에서 4.1 m이었다. 표층광의 100%에서 1% 및 저층에서의 수온, 염분, 용존 산소, pH 각각의 평균값은 정점 1에서는 9.18 ± 0.06 ($9.10 \sim 9.29$) $^{\circ}\text{C}$, 32.59 ± 0.03 ($32.52 \sim 32.63$), 9.62 ± 0.03 ($9.58 \sim 9.67$) mg L^{-1} 및 7.85 ± 0.01 ($7.83 \sim 7.86$)이었고, 정점 8에서는 9.30 ± 0.02 ($9.19 \sim 9.32$) $^{\circ}\text{C}$, 33.04 ± 0.01 ($33.01 \sim 33.08$), 9.70 ± 0.01 ($9.65 \sim 9.72$) mg L^{-1} 및 7.86 ± 0.01 ($7.82 \sim 7.92$)이었으며, 정점 11에서는 9.52 ± 0.04 ($9.38 \sim 9.63$) $^{\circ}\text{C}$, 32.93 ± 0.01 ($32.89 \sim 32.96$), 9.44 ± 0.02 ($9.40 \sim 9.50$) mg L^{-1} 및 7.84 ± 0.01 ($7.82 \sim 7.86$)이었다. 투명도는 정점 1, 8 및 11에서 각각 0.7 m, 1.2 m 및 1.5 m로서 전반적으로 탁도가 유발되는 매우 낮은 투명도 값이었다.

표층광의 100%, 50%, 12% 및 1% 해수에서 영양염류 NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} 및 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 농도를 구하였다. NH_4^+ 농도는 정점 1에서 0.45 ± 0.02 ($0.41 \sim 0.48$) μM , 정점 8에서 0.46 ± 0.13 ($0.30 \sim 0.72$) μM , 정점 11에서 0.28 ± 0.02 ($0.24 \sim 0.31$) μM 이었다(Fig. 2a). NO_2^- 농도는 정점 1에서 0.18 ± 0.00 ($0.18 \sim 0.19$) μM , 정점 8에서 0.12 ± 0.01 ($0.10 \sim 0.14$) μM , 정점 11에서 0.21 ± 0.00 ($0.21 \sim 0.22$) μM 이었다(Fig. 2b). NO_3^- 농도는 정점 1에서 3.71 ± 0.06 ($3.60 \sim 3.80$) μM , 정점 8에서 3.23 ± 0.04 ($3.18 \sim 3.30$) μM , 정점 11에서 4.51 ± 0.39 ($3.90 \sim 5.24$) μM 이었다(Fig. 2c). PO_4^{3-} 농도는 정점 1에서 0.38 ± 0.00 ($0.37 \sim 0.38$) μM , 정점 8에서 0.20 ± 0.03 ($0.16 \sim 0.25$) μM , 정점 11에서 0.39 ± 0.01 ($0.38 \sim 0.41$) μM 이었다(Fig. 2d). $\text{Si}(\text{OH})_4$ 농도는 정점 1에서 13.89 ± 0.02 ($13.86 \sim 13.94$) μM , 정점 8에서 12.51 ± 0.05 ($12.41 \sim 12.57$) μM , 정점 11에서 12.55 ± 0.05 ($12.47 \sim 12.64$) μM 이었다(Fig. 2e).

표층광의 100%, 50%, 12% 및 1% 해수에서 SPM, POM, POC, PON, POC/PON 비 및 POC/Chl *a*의 비를 구하였다. SPM은 0.7~200 μm 범위에서는 정점 1에서 22.47 ± 0.89 ($19.20 \sim 24.40$) mg L^{-1} , 정점 8에서 14.90 ± 0.44 ($13.40 \sim 16.40$) mg L^{-1} , 정점 11에서 16.27 ± 1.31 ($11.20 \sim 20.20$) mg L^{-1} 이었고, 0.7~20 μm 범위에서는 정점 8에서 13.27 ± 0.64 ($11.60 \sim 16.00$) mg L^{-1} 이었다(Table 2). SPM이 정점 1에서 다소 높은 값을 보였고, 정점 8에서 나타난 결과로 볼 때 대부분의 정점에서 0.7~20 μm 범위의 입자들이 차지하는 비율이 높은 것을 알 수 있었다. POM이 0.7~200 μm 범위에서는 정점 1에서 1.57 ± 0.10 ($1.20 \sim 1.80$) mg L^{-1} , 정점 8에서 1.23 ± 0.06 ($1.00 \sim 1.40$) mg L^{-1} , 정점 11에서 1.47 ± 0.21 ($1.00 \sim 2.40$) mg L^{-1} 이었고, 0.7~20 μm 에서는 정점 8에서 1.00 ± 0.05 ($0.80 \sim 1.20$) mg L^{-1} 이었다(Table 2). POM이 정점 1에서 다소 높은 값이었고, SPM과 마찬가지로 대부분

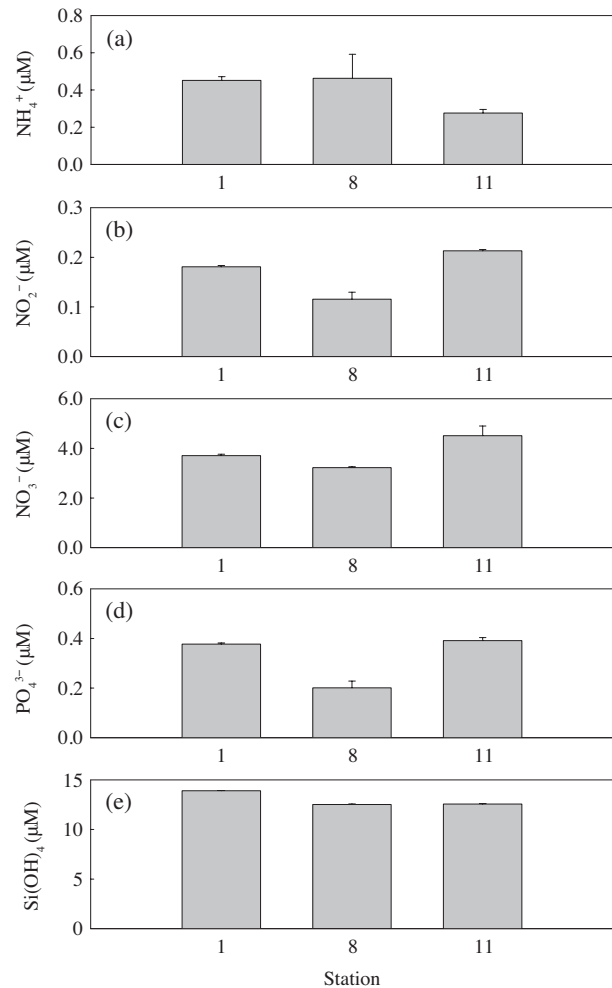


Fig. 2. Mean concentrations of NH_4^+ (a), NO_2^- (b), NO_3^- (c), PO_4^{3-} (d), $\text{Si}(\text{OH})_4$ (e) in the water (at water depths of 100%, 50%, 12% and 1% of the surface irradiance) of *Pyropia* sea farms in the Manho region on the southwestern coast of the Korean peninsula.

0.7~20 μm 범위의 입자들이 차지하는 비율이 높은 것을 알 수 있었다. POC가 0.7~200 μm 범위에서는 정점 1에서 828 ± 23 ($769 \sim 889$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 8에서 706 ± 22 ($664 \sim 796$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 11에서 685 ± 42 ($530 \sim 764$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었고, 0.7~20 μm 범위에서는 정점 8에서 642 ± 17 ($611 \sim 703$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었다(Table 2). PON은 0.7~200 μm 범위에서는 정점 1에서 86 ± 2 ($77 \sim 93$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 8에서 73 ± 3 ($64 \sim 82$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 11에서 75 ± 5 ($57 \sim 89$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었고, 0.7~20 μm 범위에서는 정점 8에서 65 ± 2 ($61 \sim 71$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었다(Table 2). POC/PON비 값이 0.7~200 μm 범위에서는 정점 1에서 9.63 ± 0.19 ($8.84 \sim 10.04$), 정점 8에서 9.75 ± 0.28 ($9.01 \sim 10.61$), 정점 11에서 9.20 ± 0.25 ($8.87 \sim 9.82$)이었고, 0.7~20 μm 범위에서는 정점 8에서 9.88 ± 0.39 ($8.66 \sim 11.57$)이었다(Table 2).

Table 2. Values of suspended particulate matter (SPM), particulate organic matter (POM), particulate organic carbon (POC), particulate organic nitrogen (PON), POC/PON, POC/Chl. *a* in the water (at water depths of 100%, 50%, 12% and 1% of the surface irradiance) the Manho region on the southwestern coast of the Korean peninsula at the study site in March 2014. Values represent means \pm SE (n = 6)

St. No	1 (0.7~200 μ m)	8 (0.7~200 μ m)	8 (0.7~20 μ m)	11 (0.7~200 μ m)	Avg. (0.7~200 μ m)
SPM (mg L^{-1})	22.47 \pm 0.89	14.90 \pm 0.44	13.27 \pm 0.64	16.27 \pm 1.31	17.88 \pm 0.88
POM (mg L^{-1})	1.57 \pm 0.10	1.23 \pm 0.06	1.00 \pm 0.05	1.47 \pm 0.21	1.42 \pm 0.12
POC ($\mu\text{g L}^{-1}$)	828 \pm 23	706 \pm 22	642 \pm 17	685 \pm 42	740 \pm 29
PON ($\mu\text{g L}^{-1}$)	86 \pm 2	73 \pm 3	65 \pm 2	75 \pm 5	78 \pm 3
POC/PON	9.63 \pm 0.19	9.75 \pm 0.28	9.88 \pm 0.39	9.20 \pm 0.25	9.53 \pm 0.24
POC/Chl. <i>a</i>	808 \pm 27	626 \pm 33	972 \pm 20	764 \pm 72	732 \pm 44

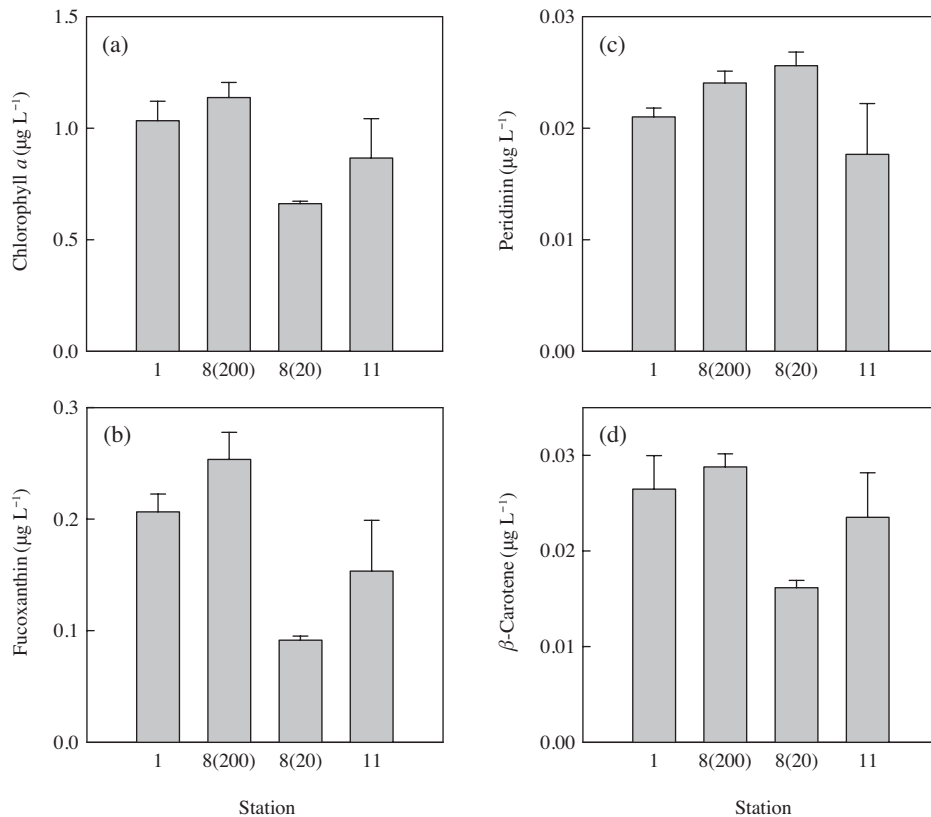


Fig. 3. Mean algal pigments chlorophyll *a* (a), fucoxanthin (b), peridinin (c) and β -carotene (d) in the water (at water depths of 100%, 50%, 12% and 1% of the surface irradiance) the Manho region on the southwestern coast of the Korean peninsula.

POC/Chl *a*의 비 값이 0.7~200 μ m 범위에서는 정점 1에서 808 \pm 27 (744~891), 정점 8에서 626 \pm 33 (524~708), 정점 11에서 764 \pm 72 (651~1,041)이었고, 0.7~20 μ m 범위에서는 정점 8에서 972 \pm 20 (900~1,036)이었다 (Table 2).

2. 식물플랑크톤 색소 조성과 농도

표층광의 100%, 50%, 12% 및 1% 해수를 UPLC를 이용하여 식물플랑크톤 색소 조성을 분석하였는데 클로로필 *a*가

0.7~200 μ m 범위에서는 정점 1에서 1.03 \pm 0.09 (0.87~1.17) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 8에서 1.14 \pm 0.07 (1.02~1.25) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 11에서 0.87 \pm 0.18 (0.51~1.06) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었고, 0.7~20 μ m 범위에서는 정점 8에서 0.66 \pm 0.01 (0.65~0.68) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었다 (Fig. 3a). 클로로필 *a*는 전 정점에서 높은 값이었고, 정점 8에서 나타난 결과로서 0.7~200 μ m 범위의 클로로필 *a* 중에서 0.7~20 μ m 범위 크기의 클로로필 *a* 값이 50% 이상을 차지하였다. 규조류 (diatoms)의 marker 색소인 fucoxanthin이 0.7~200 μ m 범위에서는 정점 1에서 0.21 \pm 0.02 (0.18~0.24)

Table 3. Primary productivity (P.P) of the phytoplankton using stable isotopes. Phytoplankton collected in the water (at water depths of 100%, 50%, 12% and 1% of the surface irradiance) the Manho region on the southwestern coast of the Korean peninsula at the study site in March 2014 (n = 10)

St. No	1 (0.7~200 μm)	8 (0.7~200 μm)	8 (0.7~20 μm)	11 (0.7~200 μm)	Average (0.7~200 μm)
Chl <i>a</i> (mg Chl a m^{-2})	13.78	11.51	6.41	10.36	11.88
P.P (mg C $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	51.05	66.71	51.33	55.40	57.72
P.P/Chl <i>a</i> (mg C h^{-1} /mg Chl <i>a</i>)	0.37	0.58	0.80	0.53	0.49

$\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 8에서 0.25 ± 0.02 ($0.22 \sim 0.30$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 11에서 0.15 ± 0.05 ($0.07 \sim 0.23$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었고, 0.7~20 μm 범위에서는 정점 8에서 0.09 ± 0.00 ($0.09 \sim 0.10$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었다 (Fig. 3b). Fucoxanthin은 전 정점 높은 값이었고, 20~200 μm 범위 크기의 규조류들이 우점하였다. 와편모조류 (dinoflagellates)의 marker 색소인 peridinin은 0.7~200 μm 범위에서는 정점 1에서 0.02 ± 0.00 ($0.02 \sim 0.02$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 8에서 0.02 ± 0.00 ($0.02 \sim 0.03$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 11에서 0.02 ± 0.00 ($0.01 \sim 0.02$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었고, 0.7~20 μm 범위에서는 정점 8에서 0.03 ± 0.00 ($0.02 \sim 0.03$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로서 전 정점에서 낮은 값이었다 (Fig. 3c). 규조류의 보조색소인 β -carotene은 0.7~200 μm 범위에서는 정점 1에서 0.03 ± 0.00 ($0.02 \sim 0.03$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 8에서 0.03 ± 0.00 ($0.03 \sim 0.03$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 정점 11에서 0.02 ± 0.00 ($0.01 \sim 0.03$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었고, 0.7~20 μm 범위에서는 정점 8에서 0.02 ± 0.00 ($0.01 \sim 0.02$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었다 (Fig. 3d).

3. 일차 생산력

1) 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력

만호해역에서 면적당 클로로필 *a*량, 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력 및 클로로필 *a*당 식물플랑크톤의 일차 생산력은 표층 광량의 100%, 50%, 12% 및 1% 값을 적분하여 사용하였다. 면적당 클로로필 *a*량은 0.7~200 μm 범위에서 정점 1은 $13.78 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-2}$, 정점 8은 $11.51 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-2}$, 정점 11은 $10.36 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-2}$ 으로 3개 정점의 적분된 평균 농도값은 11.88 ± 1.00 ($10.36 \sim 13.78$) $\text{mg Chl } a \text{ m}^{-2}$ 이었다. 조사정점 8번에서 식물플랑크톤의 크기를 구분하여 적분한 면적당 클로로필 *a* 농도값을 보면 0.7~20 μm 범위는 $6.41 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-2}$ 값으로서, 0.7~200 μm 범위의 $11.51 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-2}$ 값의 55.7%를 차지하였다 (Table 3).

식물플랑크톤의 일차 생산력은 0.7~200 μm 범위에서 정점 1은 $51.05 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 정점 8은 $66.71 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 정점 11은 $55.40 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 으로 3개 정점의 적분된 평균 농도값은 57.72 ± 4.67 ($51.05 \sim 66.71$) $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이었다. 조사정점 8번에서 식물플랑크톤의 크기를 구분한 일차 생산력을 적분하여 보면 0.7~20 μm 범위인 nanoplankton은 51.33

$\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 값이었고, 0.7~200 μm 범위인 총 식물플랑크톤은 $66.71 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 값으로서 nanoplankton이 76.9%를 차지하였다 (Table 3). 조사된 해역의 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력 평균값인 $57.72 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 인 것을 토대로 만호해역의 면적을 고려한 일차 생산력을 산정하면 $11,337 \text{ kg C d}^{-1}$ 이었다.

식물플랑크톤의 클로로필에 의한 탄소 고정 능력으로서 식물플랑크톤 활성의 지표가 되는 클로로필 *a*당 일차 생산력인 동화계수 (assimilation number, AN)는 0.7~200 μm 범위에서 정점 1은 $0.37 \text{ mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$, 정점 8은 $0.58 \text{ mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$, 정점 11은 $0.53 \text{ mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 으로 정점 8의 AN이 높은 것으로 나타났으며, 3개 정점의 적분된 평균 AN은 0.49 ± 0.06 ($0.37 \sim 0.58$) $\text{mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 이었다. 조사정점 8의 AN은 0.7~20 μm 범위인 nanoplankton은 $0.80 \text{ mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 이었고, 0.7~200 μm 범위인 총 식물플랑크톤은 $0.58 \text{ mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 로서 nanoplankton이 높은 AN을 가지는 것으로 나타났다 (Table 3).

2) 방사무늬김에 의한 일차 생산력

방사무늬김에 의한 일차 생산력의 측정은 diving-PAM을 이용하여 광합성 효율을 측정하였으며, 식물의 광합성 반응식에 의하여 구하였다. 광합성 효율은 방사무늬김 엽체를 암 적응시켜 상대적인 양자 수율과 전자 전달률을 구하는 것으로, 방사무늬김이 광합성 하는 명반응의 과정 중 암 적응 상태에서 광계II의 광화학 반응에 대한 양자수율 중 최대 양자수율은 정점 간에 큰 차이를 보이지 않았지만 최고 값은 정점 8의 0.54 ± 0.02 ($0.48 \sim 0.60$), 최저 값은 정점 7의 0.37 ± 0.04 ($0.14 \sim 0.52$)이었으며, 전체 평균값은 0.46 ± 0.03 ($0.14 \sim 0.63$)이었다 (Table 4).

최대 전자 전달률 중 최고 값은 정점 6의 18.99 ± 2.68 ($9.42 \sim 31.69$) $\mu\text{mol electrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 최저 값은 정점 10의 8.06 ± 0.91 ($3.64 \sim 12.84$) $\mu\text{mol electrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이었으며, 전체 평균값은 14.08 ± 1.42 ($2.98 \sim 31.69$) $\mu\text{mol electrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이었다 (Table 4). 정점 5, 9 및 10에서 낮은 광합성 효율을 보였고, 중간 상마도-중마도-하마도 섬을 기준으로 남서쪽의 정점에서 높은 광합성 효율을 보였다.

기울기 (α) 중 최고 값은 정점 6의 0.07 ± 0.01 ($0.05 \sim 0.10$),

Table 4. Maximal quantum yield (Fv/Fm), photosynthetic efficiency (α), minimum saturating irradiance (E_k) and maximal relative electron transport rate (rETR_{max}) of *Pyropia yezoensis* Ueda using diving-PAM. Values represent means \pm SE. Seaweed collected at the study site in March 2014 (n = 10)

St. No	Fv/Fm	α	E_k ($\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	rETR _{max} ($\mu\text{mol electrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
1	0.40 \pm 0.03	0.05 \pm 0.00	334 \pm 38	16.6 \pm 1.6
2	0.45 \pm 0.02	0.06 \pm 0.01	298 \pm 28	16.9 \pm 1.5
3	0.46 \pm 0.02	0.06 \pm 0.00	311 \pm 18	18.4 \pm 0.9
4	0.52 \pm 0.03	0.06 \pm 0.01	286 \pm 43	15.2 \pm 1.4
5	0.43 \pm 0.04	0.04 \pm 0.01	277 \pm 49	8.5 \pm 0.9
6	0.51 \pm 0.02	0.07 \pm 0.01	260 \pm 26	19.0 \pm 2.7
7	0.37 \pm 0.04	0.06 \pm 0.01	312 \pm 26	17.7 \pm 1.5
8	0.54 \pm 0.02	0.04 \pm 0.00	302 \pm 21	12.3 \pm 1.5
9	0.45 \pm 0.02	0.05 \pm 0.01	155 \pm 23	8.1 \pm 1.4
10	0.42 \pm 0.02	0.04 \pm 0.01	185 \pm 24	8.1 \pm 0.9

Table 5. Chl *a*, O₂ evolution, CO₂ fixation, Primary productivity (P.P), P.P/Chl. *a* of *Pyropia yezoensis* Ueda using diving-PAM. Seaweed collected at the study site in March 2014

St. No	Chl <i>a</i> (mg Chl <i>a</i> m ⁻²)	O ₂ evolution (mg O ₂ m ⁻² h ⁻¹)	CO ₂ fixation (mg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	P.P (mg C m ⁻² d ⁻¹)	P.P/Chl <i>a</i> (mg C h ⁻¹ /mg Chl <i>a</i>)
1	1.2	478.8	833.8	2,274	187.9
2	2.9	486.6	847.4	2,311	80.0
3	8.6	528.6	920.4	2,510	29.3
4	0.3	438.4	763.4	2,082	843.7
5	11.5	244.8	426.3	1,163	10.1
6	0.7	546.8	952.2	2,597	373.5
7	7.0	510.9	889.6	2,426	34.5
8	0.6	355.7	619.4	1,689	263.3
9	15.9	233.0	405.7	1,106	7.0
10	13.3	232.1	404.2	1,102	8.3

최저 값은 정점 5의 0.04 \pm 0.01 (0.02~0.08)이었으며, 전체 평균값은 0.05 \pm 0.01 (0.02~0.10)이었다(Table 4). 전자 전달을 위한 포화광은 지역에 따라서 일부 차이가 나타났으나 최고 값은 정점 1의 334 \pm 38 (145~492) $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 최저 값은 정점 9의 155 \pm 23 (67~267) $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이었으며, 전체 평균값은 272 \pm 30 (67~494) $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이었다.

식물의 광합성 반응식에 의거하여 방사무늬김은 이론적으로 4 $\mu\text{mol electrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 1 $\mu\text{mol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 가 발생하며 (O₂/ETR = 1/4), 산소 (O₂) 발생과 탄소 (C) 고정은 방사무늬김의 무기탄소 흡수비율과 용존 산소 생산비율에서 구해진 값으로서, mol 대 mol로 83.7 : 106로 대응한다. 따라서, 각 정점에 대한 O₂ 발생량, CO₂ 고정량, 일차 생산력 (P.P), P.P/Chl *a*를 살펴보면 다음과 같다. O₂ 발생량, CO₂ 고정량, 일차 생산력의 최고 값은 정점 6에서 각각 547 mg O₂ m⁻² h⁻¹, 952 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ 및 2,597 mg C m⁻² d⁻¹이었고, 최저 값은 정점 10에서 각각 232 mg O₂ m⁻² h⁻¹, 404 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ 및 1,102 mg C m⁻² d⁻¹이었으며, 전체 평균값은 각각 406 mg O₂ m⁻² h⁻¹, 706 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ 및 1,926 mg C m⁻² d⁻¹이

었다(Table 5). 또한, P.P/Chl *a*를 살펴보면 다음과 같다. 최고 값은 정점 4에서 844 mg C h⁻¹/mg Chl *a*이었고, 최저 값은 정점 9에서 7 mg C h⁻¹/mg Chl *a*이였으며, 전체 평균값은 184 mg C h⁻¹/mg Chl *a*이였다(Table 5). 만호해역의 김 양식 시설 배치도를 통하여 계산된 면적인 20,401,480 m²을 기준으로 방사무늬김의 생산력을 산정하면 39,295 kg C d⁻¹로 수주의 일차 생산력보다 3.5배 높은 값을 보였다. 이상으로 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력 및 방사무늬김에 의한 일차 생산력을 토대로 합산하여 2014년 3월에 계산된 만호해역의 일차 생산력은 50,632 kg C d⁻¹이었다.

고 찰

만호해역의 면적은 196,412,492 m²으로 평균 수심이 8.09 m인 해역으로 총 용적은 1,588,977,060 m³이며, 조사 지역의 김 양식장 시설량은 20,401,480 m²으로 대부분 부유식 김 양식이 활발하여 생산량이 높은 지역이다(Park 2012). 조사 해역의 해수유동 특성은 전형적인 반일주조 형태로 북서방향

의 창조류와 남동 방향의 낙조류가 나타나고, 섬 주변과 연안의 수로에서는 강한 유속과 함께 속도 구배가 크며 해저 지형의 영향으로 회전성 조석 잔차류가 발생하는 지역이다 (An and Jung 1993).

김의 생장기인 11월부터 3월까지의 생장 적정 수온은 5~8°C 범위(Kang and Koh 1977)이고, 적정 염분은 21.7~32.5 범위(Iwasaki 1965)인 것으로 나타났으나, 강진 및 해남 지역의 김 양식장으로부터 채집한 김의 온도에 대한 생장률에서 해수 온도가 증가함에 따라 생체량이 증가함이 보였고 15°C에서 가장 높은 생장률을 보여 김의 온도에 대한 생장 적정 온도는 약 15°C(NFRDI 2011)라고 하였다. 하지만 본 조사 시에 김 양식장의 수심이 2.5 m 지역이며, 표층 수온이 11.35°C 및 저층 수온이 11.20°C의 지역에서는 김의 품질 저하로 인하여 수확을 종료한 것으로 나타나 조사 시 김 양식이 이루어지고 있던 9.18~9.52°C인 10°C 이하가 김 양식의 적정 수온인 것으로 판단된다(Iwasaki 1965; Kang and Koh 1977; Tada *et al.* 2010).

일반적인 연안 해역에서의 영양염류 기원은 외양수의 유입, 육지에서의 유기물 부하, 내부생산에 의한 영양염류 감소와 퇴적물에서의 영양염류 용출의 4가지 관점에서 찾아볼 수 있다(Tada *et al.* 2010). 조사 지역에서의 영양염류 기원을 추정해 보면 조사 지역의 지역적 특성인 빠른 유속과 해저 지형의 영향으로 회전성 조석 잔차류 등에 의한 저층 퇴적물의 교란에 의하여 영양염류 등이 용출되는 것으로 판단된다(Kim *et al.* 2012a).

조사 시기 동안 SPM의 농도 중 20~200 µm 크기보다는 0.7~20 µm 크기의 작은 입자들로 이루어진 것을 알 수 있었고, SPM 중 POM이 차지하는 농도는 7.9% 정도로 Kim *et al.* (2012a)의 남서해역에서 조사된 15%보다 더 낮은 유기 입자물질로 구성되어 있음을 알 수 있었다. 따라서, 조사 지역은 육상, 외양, 양식과정 등으로 인한 유기 쇄설입자의 유입이나 빠른 유속과 해저 지형의 영향에 기인하는 퇴적물의 재 부유에 대한 영향을 받을 것으로 추측된다(Lee *et al.* 2001). 또한, 대부분의 POM은 micro-phytoplankton (20~200 µm)인 규조류로 구성된 coarse POM (CPOM)보다는 pico와 nano-plankton (0.7~20 µm)으로 구성된 fine POM (FPOM)의 작은 입자들로 이루어진 것을 알 수 있었다.

POM 중 한 성분의 다른 성분에 대한 비 값은 POM의 기원을 설명할 수 있는데, POC/Chl *a* 비는 POM의 조성 차이에 대하여 유용하게 이용된다(Zeitzschel 1970; Berg and Newell 1986). POC/Chl *a* 비가 100 이하는 POC의 대부분이 식물플랑크톤에서 주로 유래하고, 높은 값일수록 유기 쇄설입자(non-living detritus)의 점유율이 높아진다는 것을 나타낸다. Kim *et al.* (2012a)에 의하면 서부 김 양식장 연안의 일

부 정점에서 POC/Chl *a* 비가 100 이하로 나타나 식물플랑크톤의 기여가 높다는 것을 밝혀냈지만 대부분의 정점에서 POC/Chl *a* 비가 600 이상으로서 POC에 대한 높은 유기 쇄설입자의 기여를 보여주었고, 본 조사 해역에서도 POC/Chl *a* 비가 600 이상 1,000 이하로서 POC에 대한 높은 유기 쇄설입자의 기여를 보여주었다(Menzel and Ryther 1964). 일반적으로 식물플랑크톤의 전형적인 C:N비 값은 6~7로 알려져 있으며, C:N의 비 값이 7 이상은 POM의 많은 부분이 유기 쇄설입자라는 것을 나타내고 그것보다 낮은 값은 높은 생물 기여를 나타낸다. 따라서, 본 연구에서의 C:N의 비 값이 8.88~9.97로서 POM의 상당부분이 유기 쇄설입자로 이루어져 있음을 알 수 있다(Fabiano *et al.* 1996).

만호해역에서 측정된 해수의 조류 색소량은 규조류(diatoms)의 marker 색소인 fucoxanthin이 높은 점유율을 보였으나, 와편모조류(dinoflagellates)의 marker 색소인 peridinin은 조사 시기 동안 변이를 보이지 않았으며, 겨울철 저수온 시기에 fucoxanthin이 높은 농도로 검출된 것으로 보아 전체 식물플랑크톤 생체량 중 가장 높은 비율을 차지하고 있다는 것을 알 수 있었다(Kim *et al.* 2012a; Min *et al.* 2012). 정점 8에서 분석된 색소 중 규조류의 marker 색소인 fucoxanthin을 20~200 µm 범위와 0.7~20 µm 범위로 구분하여 계산한 결과를 보면 20~200 µm 범위가 전체의 64%를 차지하는 것으로 나타났고, 와편모조류의 marker 색소인 peridinin을 20~200 µm 범위와 0.7~20 µm 범위로 크기를 구분하여 계산한 결과를 보면 대부분이 0.7~20 µm 범위를 차지하고 있어 Kim *et al.* (2012a)의 결과에서와 마찬가지로 조사 해역의 식물플랑크톤 생체량 중에서는 크기가 큰 규조류가 우점하고 있음을 알 수 있었다.

섬진강 하구역의 2월에 조사된 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력은 9~256 mg C m⁻² d⁻¹로서 5월 및 8월에 조사된 일차 생산력보다 낮은 값을 보였으며(Min *et al.* 2012), 서해 중동부 연안수역, 경기만, 섬진강 하구 및 베령해에서 다른 계절보다 동계에 낮은 일차 생산력을 보이는 것으로 나타나(Kang *et al.* 1992; Kim and Lee 1999; Min *et al.* 2012) 만호해역에서 3월 조사에 대한 계절적 영향을 받았을 것으로 판단된다. 그리고, 계절적 영향에 의한 낮은 수온으로 인해 식물플랑크톤의 대사율이 떨어질 뿐만 아니라 지역적인 특성인 조석이나 강한 바람으로 저층 퇴적물이 재 부유되어 탁도가 높아졌으며, 투명도가 0.7~1.5 m로 광조건의 악화에 의한 식물플랑크톤의 광합성에 저해 요인으로 작용했을 것으로 판단된다(Kang *et al.* 1992; Yoon 2014). 또한, 식물플랑크톤의 크기에 의한 기여율을 보면 경기만에서 nanoplankton에 의한 일일 평균 일차 생산력이 총 일차 생산력에 대해 43.4%를 기여하였으나(Kang *et al.* 1992), 본

조사에서는 76.9%를 차지하였고, 식물플랑크톤 생체량의 경우 20~200 μm 범위의 크기가 큰 규조류가 우점하였으나, 식물플랑크톤의 크기를 구분하여 적분한 일차 생산은 20~200 μm 범위보다 오히려 0.7~20 μm 범위에서 높아 만호해역에서 일차 생산은 pico나 nano-plankton에 의한 기여도가 높은 것으로 판단된다. 이러한 원인으로 Yoon (2014)에 의하면 바람과 조석 혼합에 의한 물리적 교란에 의하여 높은 무기 영양염류 공급은 원활하지만 높은 부유물질에 의한 광 투과 저해로 인해 상대적으로 높은 영양염류를 요구하는 대형 식물플랑크톤 성장을 저해시킨다고 하였다.

식물플랑크톤 활성의 지표가 되는 AN은 동계 베링해에서 1.63~1.99 $\text{mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$, 동계 서해 중동부 연안수역에서 1.13~11.02 $\text{mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 및 2월 진해만에서 1.53 $\text{mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 보다 낮은 값이 나타났으며, 동계 섬진강 하구에서 계산된 값 0.1~0.3 $\text{mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 와 비슷하거나, 높은 것으로 나타났다(Kang *et al.* 1992; Kim and Lee 1999; Park *et al.* 2001; Min *et al.* 2012). 조사 지역의 nano-plankton에 의한 AN은 경기만에서 1.09~8.71 $\text{mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 및 서해 중동부 연안 수역 1.16~9.92 $\text{mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 보다도 낮은 것으로 나타났으며(Kang *et al.* 1992), 총 식물플랑크톤에 의한 nanoplankton의 AN은 137.9%로 식물플랑크톤의 활성도가 nanoplankton 크기에서 높은 것으로 나타났다.

만호해역에서 양식되고 있는 김의 광합성 효율은 방사무늬김 엽체를 암 적응시켜 상대적인 양자 수율을 구하는 것으로, 조사 정점에 의한 최대양자수율은 0.37~0.54 범위로서 Kang *et al.* (2009) 및 Kim *et al.* (2012b)의 방사무늬김에 대한 각각의 최대양자수율 $0.54 \pm 0.01 \sim 0.65 \pm 0.03$ 및 $0.46 \pm 0.07 \sim 0.55 \pm 0.03$ 보다 낮거나 비슷한 값이었으며, Zhang *et al.* (2011)의 방사무늬김에 대한 최대양자수율 0.17~0.22보다는 높은 값이 나타났다. Korbee *et al.* (2005a, b)에 의한 *Pyropia leucosticta*에 대해서는 0.68 ± 0.02 와 0.70 ± 0.03 을 보였고, *Pyropia umbilicalis*의 경우는 0.44 ± 0.02 로서 김 종류나 서식 지역에 따라서 0.17~0.70의 범위로 나타났다. 단위 엽록소 당 전자 전달률로 잠재적인 광합성 능력을 의미하는 방사무늬김에 의한 최대 상대 전자 전달률은 $8.1 \pm 0.9 \sim 19.0 \pm 2.7 \mu\text{mol electrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 범위로서 Kim *et al.* (2012b)의 $4.7 \pm 0.1 \sim 5.8 \pm 0.4 \mu\text{mol electrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 보다는 높았고, Kang *et al.* (2009)의 $10.3 \pm 0.4 \sim 15.1 \pm 1.1 \mu\text{mol electrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 을 포함한 범위 값을 보였다. 이러한 차이는 지역 또는 해양 환경적 요인 등에서의 차이 김의 종류나 서식 지역에 따라서 달라지고, 현장과 실내 실험의 조건에 따라서 달라지는 것으로 나타났다.

Kim *et al.* (2012b)에 의한 방사무늬김의 포화광은 130~

180이었고, Gantt (1990)의 방사무늬김에 대한 포화광 및 성장을 위한 광 값을 Kato and Aruga (1984)의 논문으로부터 재 계산하였는데 각각 $130 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $180 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이라고 하였다. 또한 조사된 김의 포화광 값은 155~334 (평균 272) $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 범위로서 Kim *et al.* (2012b)과 Kato and Aruga (1984)보다는 높은 값으로 나타났다. 산소 발생률은 본 연구에서 $232 \sim 547 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 으로서 Kim *et al.* (2012b)의 산소 발생률 $136 \sim 168 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 와 NFRDI (2011) 산소 발생률 $200 \sim 350 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 보다 높은 값이었다. Kim *et al.* (2012b)의 단위 면적당 클로로필 *a*량을 재 계산하면 $6.0 \sim 49.4 \text{ mg Chl } a \text{ DW m}^{-2}$ 이고, 방사무늬김에 대한 일차 생산력은 $509 \sim 631 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로서 본 연구의 단위 면적당 클로로필 *a*량 $0.3 \sim 15.9 \text{ mg Chl } a \text{ DW m}^{-2}$ 보다는 높았으나, 방사무늬김에 대한 일차 생산력 $1,102 \sim 2,597 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 보다는 낮은 값이었다.

방사무늬김에 대한 활성의 지표가 되는 AN은 $7.0 \sim 843.7 \text{ mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 로서 Kim *et al.* (2012b)의 재 계산된 값 $1.2 \sim 9.4 \text{ mg C h}^{-1}/\text{mg Chl } a$ 보다는 높은 활성을 가지는 것으로 나타났다(Kim *et al.* 2015). 만호해역의 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력이 다른 해역보다 낮고 김의 일차 생산력이 식물플랑크톤의 일차 생산력보다 약 3.5배 높은 이유는 바람과 조석 혼합에 의한 물리적 교란에 의하여 부유물질에 의한 광 투과 저해로 인해 상대적으로 대형 식물플랑크톤 성장을 저해하는 만호해역 김 양식장의 해양환경 특성이 김 성육 시기의 중간 경쟁을 차단시켜 방사무늬김의 생산력을 증가시키는 데 기여한 것으로 판단된다.

적 요

김 양식을 하고 있는 해역의 물리·화학적 해양환경 특성, 식물플랑크톤 색소 조성 및 농도, 식물플랑크톤 및 방사무늬김의 일차 생산력을 2014년 3월에 김 양식이 이루어지고 있는 만호해역에서 조사를 하였다.

수온은 $9.1 \sim 9.6^\circ\text{C}$, 염분은 $32.5 \sim 33.1$ 이었고, 투명도는 높은 탁도로 인하여 유광층이 낮아져 $0.7 \sim 1.5 \text{ m}$ 를 보였다. 수층의 용존 무기질소, 용존 무기인 및 규산 규소 각각의 농도는 $3.59 \sim 5.73 \mu\text{M}$, $0.16 \sim 0.41 \mu\text{M}$, $12.41 \sim 13.94 \mu\text{M}$ 이었다. 클로로필 *a* 농도는 $0.51 \sim 1.25 \mu\text{g L}^{-1}$ 이었고, $0.7 \sim 20 \mu\text{m}$ 범위의 nanoplankton의 클로로필 *a* 농도가 58%를 차지하였다. 규조류의 marker 색소인 fucoxanthin의 농도는 $0.51 \sim 1.25 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 전 정점에서 높은 값이었고, $20 \sim 200 \mu\text{m}$ 범위의 fucoxanthin이 64%를 차지하였다. 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력은 $57.72 \pm 4.67 (51.05 \sim 66.71) \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었고,

0.7~20 μm 범위의 nanoplankton이 76.9%를 차지하였으며, 면적을 고려한 일차 생산력은 $11,337 \text{ kg C d}^{-1}$ 이었다. 방사무늬김에 의한 평균 일차 생산력은 $1,926 \pm 192 (1,102 \sim 2,597) \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었고, 면적을 고려한 일차 생산력은 $39,295 \text{ kg C d}^{-1}$ 이었다. 식물플랑크톤과 방사무늬김에 의한 일차 생산력을 토대로 계산된 만호해역의 일차 생산력은 $50,632 \text{ kg C d}^{-1}$ 로 나타났다. 만호해역의 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력이 다른 해역보다 낮고, 김의 일차 생산력이 식물플랑크톤의 일차 생산력보다 약 3.5배 높았다.

사 사

이 논문은 2016년도 국립수산물과학원 수산물과학연구사업 (R2016055)의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- An H-S and J-Y Jung. 1993. Ocean circulation due to tidal residual current around the Myongnang strait. J. Korean Earth Science Society 14:100-108.
- Beer S and A Eshel. 1985. Determining phycoerythrin and phycocyanin concentrations in aqueous crude extracts of red algae. Aust. J. mar. Freshw. Res. 36:785-792.
- Berg JA and RIE Newell. 1986. Temporal and spatial variations in the composition of seston available to the suspension feeder *Crassostrea virginica*. Estuar. Coast. Shelf. Sci. 23:375-386.
- Chin P and SY Hong. 1985. The primary production of phytoplankton in the western channel of the Korea strait. Bull. Korean Fish. Soc. 18:74-83.
- Choi TS and KY Kim. 2005. The effect of substrate on ecophysiological characteristics of green macroalga *Ulva pertusa* Kjellman (Chlorophyta). Algae 20:369-377.
- Fabiano M, P Povero and R Danovaro. 1996. Particulate organic matter composition in Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica) during summer 1990. Antarct Sci. 8:7-13.
- Gantt E. 1990. Pigmentation and photoacclimation. pp. 203-220. In Biology of the red algae (Cole KM and RG Sheath, eds.). Cambridge University Press. Cambridge.
- Hama T, T Miyazaki, Y Ogawa, M Iwakuma, M Takahashim, A Otsuki and S Ichimura. 1983. Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable isotope ^{13}C . Mar. Biol. 73:31-36.
- Hong Y-N. 2001. Photosynthesis. pp. 155-172. In Biology -The science of life- (Lee K-W, HY Koo, W Kim, JS Yang, K-S Yoon, JS Lee, CI Choi and Y-N Hong, eds.). Eulyoo Publishing Company. Seoul. Korea.
- Iwasaki H. 1965. Studies on the physiology and ecology of *Porphyra tenera*. J. Fac. of Fish and Animal Husbandry. Hiroshima Univ. 6:171-193.
- Jeffrey SW. 1997. Application of pigment methods to oceanography. pp. 127-166. In Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods (Jeffrey SW, RFC Mantoura and SW Wright, eds.). UNESCO publishing. Paris.
- JGOFS. 1996. Protocols for the Joint Biobal Ocean Flux Studies (JGOFS) Core Measurement, JGOFS report No. 19. 210pp.
- Kang JW and NP Koh. 1977. Seaweed aquaculture. Taehwa Publishing Company. Busan. Korea. 294pp.
- Kang YS, JK Choi, KH Chung and YC Park. 1992. Primary productivity and assimilation number in the Kyonggi Bay and the mid-eastern coast of Yellow Sea. J. Oceanol. Soc. Korea 27:237-246.
- Kato M and Y Aruga. 1984. Comparative studies on the growth and photosynthesis of the pigmentation mutant of *Porphyra yezoensis* in laboratory culture. Jap. J. Phycol. 32:333-347.
- Kim JB and JU Lee. 1999. Phytoplankton productivity in the Bering Sea in winter. Bull. Nat'l. Fish. Res. Dev. Inst. Korea 56:211-219.
- Kim JB, W-C Lee, S Hong, H-G Choi, JH Shim, J-I Park, J Park and EG Lee. 2012a. Relationship between Environmental Characteristics and Pigment Composition and Concentrations of *Porphyra yezoensis* Ueda in the Southwestern Coast of the Korean Peninsula. Korean J. Environ. Biol. 30:200-209.
- Kim JB, W-C Lee, HC Kim, H-G Choi, J-I Park, Y Cho and HH Park. 2012b. Photosynthetic Characteristics of *Porphyra yezoensis* Ueda measured in situ by Diving pulse-Amplitude Modulated (PAM) Fluorometry on the Southwestern Coast of the Korean Peninsula. Korean J. Environ. Biol. 30:210-218.
- Kim JB, W-C Lee, HC Kim and S Hong. 2015. Pigment composition and concentrations of *Porphyra yezoensis* Ueda in Jindo-Haenam on the southern coast of the Korean Peninsula determined by UPLC. Korean J. Environ. Biol. (submitted).
- Kim YH. 1996. The biology of marine plants. Hyungseul Publishing Company. Seoul. Korea. 293pp.
- Korbee N, FL Figueroa and J Aguilera. 2005a. Effect of light quality on the accumulation of photosynthetic pigments,

- proteins and mycosporine-like amino acids in the red alga *Porphyra leucosticta* (Bangiales, Rhodophyta). *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.* 80:71-78.
- Korbee N, P Huovinen, FL Figueroa, J Aguilera and U Karsten. 2005b. Availability of ammonium influences photosynthesis and the accumulation of mycosporine-like amino acids in two *Porphyra* species (Bangiales, Rhodophyta). *Mar. Biol.* 146:645-654.
- Lee P-Y, C-K Kang, W-J Choi and H-S Yang. 2001. Seasonal variation of the quantity and quality of seston as diet available to suspension-feeders in Gosung and Kangjin Bays of Korea. *J. Korean Fish. Soc.* 34:340-347.
- Menzel DW and JH Ryther. 1964. The composition of particulate organic matter in the western north Atlantic. *Limnol. Oceanogr.* 9:179-186.
- Min J-O, SY Ha, MH Chung, BH Choi, YJ Lee, SH Youn, WD Yoon and JS Lee. 2012. Seasonal variation of primary productivity and pigment of phytoplankton community structure in the Seomjin Estuary. *Korean J. Limnol.* 45:139-149.
- Ministry of Oceans and fisheries. 2014. http://www.fips.go.kr/jsp/farm/farm_info4.jsp?menuDepth=030102.
- NFRDI. 2011. The carrying capacity for laver mariculture from according to marine ecosystem in the southwest coast, Korea. In 2011 year report of national fisheries research & development institute. NFRDI. 86.
- Park J. 2012. Estimation of mass balance and carrying capacity in *Porphyra* farm, MS Thesis. Pukyong National University. Busan. 49.
- Park M-O, C-H Moon, S-Y Kim, S-R Yang, K-Y Kwon and Y-W Lee. 2001. The species composition of phytoplankton along the salinity gradients in the Seomjin River estuary in autumn, 2000: comparison of HPLC analysis and microscopic observations. *Algae* 16:179-188.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. New York. 173 pp.
- Poole HH and WRG Atkins. 1929. Photoelectric measurement of submarine illumination throughout the year. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.* 16:297-324.
- Ralph PJ, R Gademann and WC Dennison. 1998. In situ sea-grass photosynthesis measured using a submersible pulse amplitude modulated fluorometer. *Mar. Biol.* 132:367-373.
- Rysgaard S, M Kühl, RN Glud and JW Hansen. 2001. Biomass, production and horizontal patchiness of sea ice algae in a high-Arctic fjord (Young Sound, NE Greenland). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 223:15-26.
- Schreiber U. 2004. Pulse-amplitude-modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: an overview. pp. 279-319. In *Chlorophyll fluorescence: a signature of photosynthesis* (Papageorgiou GC and Govindjee. eds.). Springer. Dordrecht. The Netherlands.
- Shim JH, JR Hwang, SY Lee and J-N Kwon. 2014. Variations in nutrients & CO₂ uptake rates of *Porphyra yezoensis* Ueda and a simple evaluation of in situ N & C demand rates at aquaculture farms in south Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 32:297-305.
- Tada K, M Fujiwara and T Honjo. 2010. Water quality nori (*Porphyra*) culture in the Seto Inland Sea. *The Japan Soc. Anal. Chem.* 59:945-955.
- Wright SW, SW Jeffrey, RFC Mantoura, CA Llewellyn, T Bjørnland, D Repeta and N Welschmeyer. 1991. Improved HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 77:183-196.
- Yoon YH. 2014. Marine Environments and Production of Laver Farm at Aphae-do Based on Water Quality and Phytoplankton Community. *Korean J. Environ. Biol.* 32:159-167.
- Zeitzschel B. 1970. The quantity, composition and distribution of suspended particulate matter in the Gulf of California. *Mar. Biol.* 7:305-318.
- Zhang T, Z Shen, P Xu, J Zhu, Q Lu, Y Shen, Y Wang, C Yao, J Li, Y Wang and H Jiang. 2011. Analysis of photosynthetic pigment and chlorophyll fluorescence characteristics of different strains of *Porphyra yezoensis*. *J. Appl. Phycol.* (published online)

Received: 30 July 2015

Revised: 17 January 2016

Revision accepted: 27 January 2016