

남서해역에서 양식되는 방사무늬김 (*Porphyra yezoensis* Ueda)의 색소조성과 농도에 영향을 미치는 해양환경 특성

김정배* · 이원찬 · 홍석진 · 심정희 · 박정임¹ · 박지혜 · 이유진

국립수산과학원 어장환경과, ¹해양생태기술연구소

Relationship between Environmental Characteristics and Pigment Composition and Concentrations of *Porphyra yezoensis* Ueda in the Southwestern Coast of the Korean Peninsula

Jeong Bae Kim*, Won-Chan Lee, Sokjin Hong, Jeong Hee Shim,
Jung-Im Park¹, Jihye Park and Eu Gene Lee

Marine Environment Research Division, National Fisheries Research and
Development Institute, Busan 619-705, Korea

¹Marine Eco-Technology Institute, Busan 608-830, Korea

Abstract - The effect of water temperature, salinity and water column nutrient contents on pigment composition and concentration of purple lavers were studied at the main purple lavers production areas in Southwestern coast of Korea, during January to March, 2011. Water temperature was between 3.0 and 11.3°C. Salinity range was between 32.7 and 34.7, those were lower St. 1 and St. 6, which were at close to the seashore. Water column dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP) and silicate concentrations were 1.73 ~ 12.84 μM, 0.07 ~ 0.67 μM and 4.93 ~ 18.29 μM, respectively. Chl *a* concentration was between 0.41 and 9.14 μg L⁻¹, and it was the highest at St. 1 during January. Photosynthetic pigment of fucoxanthin was dominant at all sites, which showed its highest concentration (0.06 ~ 3.41 μg L⁻¹) at St. 1 on January. Water column DIN concentration was higher at January during low salinity period at all sites, but it was low at St. 1. Photosynthetic pigment of Chl *a*, PE and PC concentration of porphyra blades was between 1,173 ~ 8,124 μg DW g⁻¹, 3,281 ~ 10,076 μg DW g⁻¹, 388 ~ 1,346 μg DW g⁻¹, respectively. The concentration was relatively high at the St. 2 and St. 3. The pigment concentration of porphyra blades was higher at only *Porphyra yezoensis* was cultured than at *Porphyra yezoensis* and *Porphyra seriata* were cultured. The pigment concentration of porphyra blades was higher at St. 2 and St. 3 in only *Porphyra yezoensis* was cultured. This study shows that pigment concentration of *porphyra blades* may depend on habitat environment and culture methods.

Key words : marine environment, purple lavers, pigment concentration, *Porphyra yezoensis*

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

서론

남서해역은 풍부한 영양염과 유속이 빠른 지정학적 요인 때문에 김 양식이 많이 이루어지는 해역으로 2010년도 기준으로 51,501속을 생산하여 물김의 무게로는 124,169톤(1속=2.411 kg)으로 우리나라 김 생산의 52.7%를 차지하고 있다(이 2010; 국립수산물연구원 2012). 김의 성장에 필요한 환경요인으로 수온, 염분, 광도, 일조 시간, 영양염류, 유기 쇄설물 및 이산화탄소 등이 있는데 이들의 변화는 김의 일반적인 생활사인 배우체의 발아기, 발육 생장기, 성장 최성기의 발생시기와 광합성율에 영향을 미친다(Iwasaki 1965; 강과 고 1977; 장 등 1983; Tada *et al.* 2010). 최근 우리나라 서해안을 중심으로 낮은 영양염 농도에 기인하는 김의 황백화 현상이 일어나고 있으며, 영양염 부족 현상은 식물플랑크톤의 이상번식 외에 외양수의 유입, 육역 부하량의 감소 등으로 일어날 수 있다(Tada *et al.* 2010).

해조류의 광합성 색소는 chlorophyll계, carotenoide계(carotene과 xanthophyll) 및 phycobilin계의 세 가지 주요 범주를 사용하고 있다(Dring 1983). 홍조식물인 김은 주 색소인 클로로필 *a*와 보조색소인 phycoerythrin, phycocyanin과 carotenoide가 풍부하게 존재한다(강과 고 1977). 풍부한 김 엽체의 주 색소 및 보조 색소 농도의 변화요인은 김의 종류, 양식 기간 및 시기, 양식장의 조건, 양식 기법에 따라서 김 엽체의 색소 농도가 변화될 수 있다(강과 고 1977). 또한, 광합성 증진이라는 에머슨 효과는 한 가지 또는 그 이상의 보조 색소가 Chl *a*와 결합되어 활성화될 때, 이들 색소가 제각기 별개로 활성화

될 때보다 광합성 효율이 증가되는데 홍조류의 보조색소인 phycoerythrin과 phycocyanin은 광합성을 위해서 엽록소가 흡수하지 못하는 영역의 가시광선을 효과적으로 흡수한다(Lobban and Harrison 1994; Dawes 1997). Xanthophyll 중의 zeaxanthin과 β -carotene은 매우 높은 빛에 의하여 Chl *a*가 광산화(photo-oxidation)되는 것을 보호해 주는 역할을 한다(Dring 1983; Taiz and Zeiger 1991). 이러한 광합성 색소의 역할에도 불구하고 남서해역에서 양식되고 있는 김의 광합성 색소들에 대하여 알려진 바가 거의 없어 본 연구에서는 서식지역의 해양환경 특성에 따른 김의 광합성 색소 조성 및 농도에 대해서 알아보려고 한다.

재료 및 방법

1. 김 양식장의 환경 특성

김 양식은 인공 채묘와 자연 채묘를 통해서 이루어지는데 일반적으로 인공 채묘는 9~10월 초기에 채묘를 하여 12월에 김의 생산이 이루어지고, 자연 채묘는 11월 중기에 채묘가 이루어져 1월부터 채취하기 시작하여 4~5월까지 김의 채취가 이루어진다. 따라서 본 조사 시기에 채취된 김은 자연 채묘일 가능성이 높을 것으로 판단되며, 분류는 황과 이(2001)에 따라 동정하였다. 조사 정점 1과 6의 경우 각 지점당 3개의 양식장 중 각각 1개의 양식장에서는 방사무늬김(*Porphyra yezoensis* Ueda)만 양식되었고, 각각 2개의 양식장에서는 방사무늬김과 모무늬돌김(*Porphyra seriata* Kjellman)이 혼합 양식되어 조사정점 각각의 비율은 평균 약 87:13과 57:43이었고, 조사정점 2~5는 크기와 모양이 조금씩 다르지만 모두 방사무늬김이 양식되고 있어 각 정점의 색소 분석은 방사무늬김을 대상으로 색소를 분석하였다.

조사해역은 남서해역의 김 양식장으로서 수심이 얇은 연안에는 주로 지주식으로 양식되고, 수심이 깊은 외양 쪽에서는 부류식으로 양식되고 있으며, 조사 시기는 2011년 1월부터 3월까지 6개 정점에 대하여 조사되었다(Fig. 1). 김 양식장의 환경 특성은 김의 양식 수심을 고려하여 수면 하 평균 0.3m 수심에서 조사가 이루어졌고, 김의 광합성 색소 분석은 양식 김 수확 시기가 약 한 달인 것을 감안하여 첫 번째 수확 후 3주가 지나 수확이 가능한 시점의 김을 대상으로 조사시료를 이용하였다.

수온, 염분, 용존 산소와 pH는 수질측정기(YSI, 6920)를 이용하여 측정하였다. 투명도는 투명도판을 수중에서 보이지 않는 깊이까지 내린 다음 천천히 끌어올리면서 투명도판이 보이기 시작하는 수심까지 측정하였다. 광

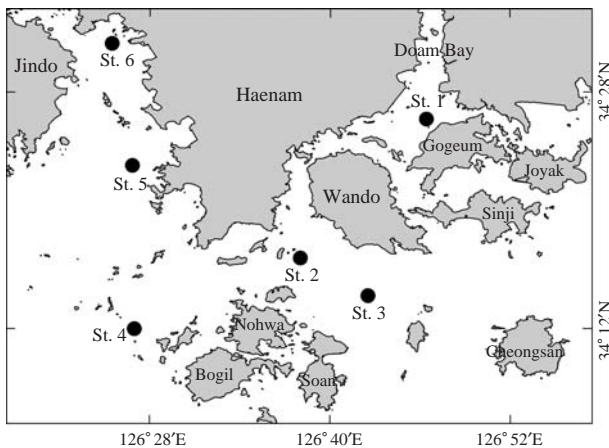


Fig. 1. Seaweed study area. Seaweed observed in dotted area on the southwestern coast of the Korean peninsula from January to March 2011.

소멸 계수는 광량계로 수십별 광량을 측정하여 자연 로그(\log_{10})를 취한 후 수십과 광량의 회귀 직선식 중 기울기로 광 소멸 계수를 구하였다.

조사지역의 영양염류, 총 부유입자물질 (SPM), 입자유기물질 (POM), 입자유기탄소 (POC), 입자유기질소 (PON), 용존 유기탄소 (DOC), 클로로필 *a* (Chl *a*) 및 색소 분석을 위한 시료들은 표층해수를 채수하였다. 현장에서 영양염과 용존 유기탄소의 분석을 위하여 채집된 시료를 450°C에서 4시간 동안 미리 회화시킨 GF/F 여과지를 사용하여 여과한 해수를 각각의 샘플병에 넣었다. 총 부유입자물질은 사전 무게가 측정된 47 mm GF/F 여과지에 500 mL의 해수를 여과한 후 여과지의 염분을 제거하기 위하여 약 10 mL의 초순수로 3회 반복하여 여과기와 여과지를 세척하였으며, 입자유기탄소와 입자유기질소는 25 mm GF/F 여과지로 여과하고 1 N HCl 용액을 첨가하여 무기탄소를 제거하였다. 또한, Chl *a* 및 색소 분석을 위하여 47 mm GF/F 여과지에 500 mL의 해수를 여과한 후 GF/F 여과지로 여과된 현장해수로 여과기와 여과지를 세척하였다. 모든 시료는 현장에서 전 처리를 한 후 냉동 보관하여 실험실로 운반하였다.

영양염류 분석은 암모늄염 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 질산염 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), 아질산염 ($\text{NO}_2^-\text{-N}$), 인산염 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)과 규산염 ($\text{SiO}_2^-\text{-Si}$)을 영양염 자동분석기 (Bran+Luebbe, Quattro, Germany)를 이용하여 측정하였다 (해양수산부 2005). 총 부유입자물질은 실험실에서 60°C 건조기 속에서 24시간 동안 건조한 후 무게 차를 이용하여 계산하였다. 입자유기물질은 총 부유입자물질을 구하기 위하여 무게를 측정한 여과지를 550°C에서 5시간 회화한 후 무게 차를 이용하여 계산하였다. 입자유기탄소와 입자유기질소는 여과지를 실험실에서 60°C 건조기에서 건조하여 CHN분석기 (Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Italia)를 이용하여 분석한 후 계산하였다. 용존 유기탄소는 총 유기 탄소분석기 (TOC-VCPH, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석한 후 계산하였다.

2. 색소 조성과 농도

표층 해수와 김 엽체의 광합성 색소 분석을 위하여 HPLC시스템 (waters 2690, Waters, USA)으로 Chl *a*, *b*, *c*, phaeophytin *a*, chlorophyllide *a*, 보조색소인 carotenoid 12종을 측정하였다. 홍조류인 김 엽체의 광합성 색소 중 phycoerythrin과 phycocyanin은 Beer and Eshel (1985)의 실험방법으로 분석하였다. 표층해수의 광합성 색소 분석은 현장에서 여과된 여과지를 10 mL culture tube에 넣고 100% acetone 5 mL을 넣어 내부표준물질 canthaxanthin

Table 1. Condition of HPLC and solvent system in analyzing algal and seaweed pigments

HPLC	: Waters 2690
Detector	: Absorbance (Waters 2487) at 436 nm Fluorescence (Waters 474) at $\lambda_{em}=650$ nm, $\lambda_{ex}=432$ nm
Column	: Rexchrom-S5-100-ODS (Regis, USA, 250×4.6 mm, particle size: 5 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	: 0.5~1 mL min ⁻¹

을 50 μ L 첨가한 뒤 초음파 분쇄를 5분 정도 실시하고, -20°C의 냉암소에서 24시간 추출하였다 (Wright *et al.* 1991; Jeffrey 1997). 24시간의 추출 기간 중에 분쇄기를 이용하여 여지를 분쇄하고, 2,000 rpm에서 10분 동안 원심 분리하여 상등액을 0.45 μ m PTFE filter로 여과하였다. 이 중 시료 1 mL와 300 μ L의 HPLC grade water를 vial에 넣어 잘 혼합한 후 HPLC 100 μ L loop에 주입하여 분석하였고, 색소분석을 위한 용매 system은 박 등 (2001)의 조건과 동일하였다 (Table 1). 김 엽체의 광합성 색소분석을 위한 시료는 얼음을 채운 쿨러에 보관하여 실험실로 운반하였으며, 실험실에서 중 동정을 거친 김 시료들은 냉동시킨 후 동결 건조시킨 다음 불 분쇄기 (pulverisette 23, Fritsch, Germany)로 미세하게 분쇄하였다. 분쇄된 시료 중 0.01 g의 건 시료를 10 mL culture tube에 넣은 후 해수 시료의 색소분석과 동일한 방법으로 분석하였다. 김 엽체의 광합성 색소 중 phycoerythrin과 phycocyanin은 수용성으로서 0.01 g의 건 시료를 0.1 M 인산완충용액 5 mL를 넣고 잘 혼합하여 준다. 이 후 4°C의 냉암소에서 12시간 이상 추출한 후 원심분리를 이용하여 3,000 rpm에서 20분간 원심분리한 후 상등액을 자동 피펫으로 분취하여 셀에 넣은 후 분광광도계 (carry 100, Varian, USA)로 흡광도를 측정하여 계산하였다 (Beer and Eshel 1985).

3. 통계분석

각 정점별 분석된 해양환경 요소분석을 위하여 정점 간 유사도를 평가하고 군집 경계를 정하기 위하여 군집분석 (cluster analysis)을 실시하였다. 광합성 색소 상호 간의 관계를 알아보기 위하여 광합성 색소의 변수들을 \log_{10} 으로 변환하여 상관관계분석 (correlation analysis)을 수행하고 유의성을 검정하였다 ($P < 0.05$). 통계분석은 SPSS 10.1을 이용하였으며, 측정치는 평균 (mean)과 표준오차 (SE)로 나타내었다.

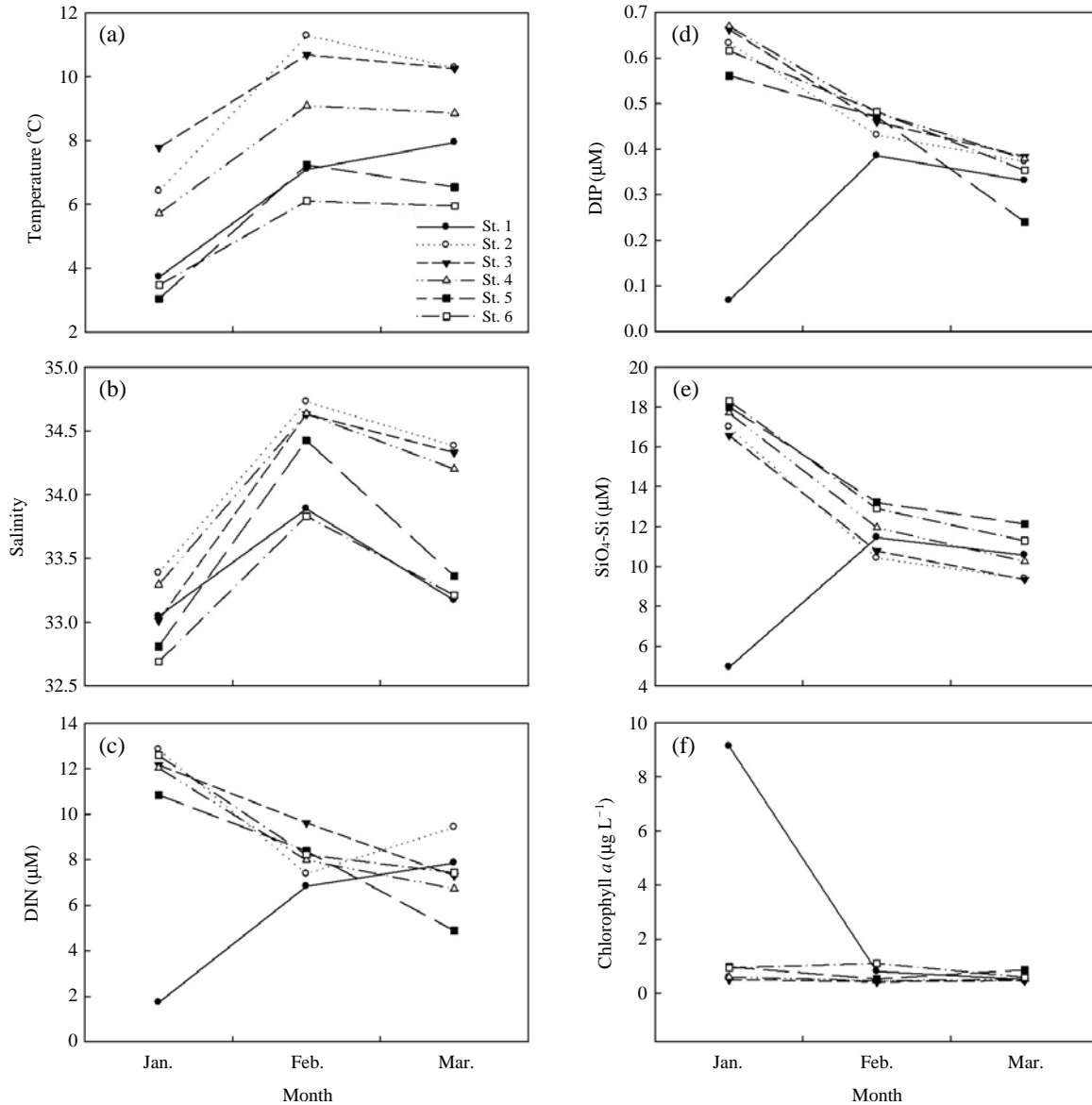


Fig. 2. Variations of temperature (a), salinity (b), DIN (c), DIP (d), silicate (e) and chlorophyll *a* (f) in the surface water on the southwestern coast of the Korean peninsula.

결 과

1. 김 양식장의 환경 특성

조사 기간 중 수온은 1월에 3.0~7.8°C, 2월에 6.1~11.3°C, 3월에 6.0~10.3°C를 보였고, 2월 달 내만의 조사 정점 1번, 5번과 6번 정점의 평균 수온은 6.8(6.1~7.2)°C 내외였고, 2번, 3번과 4번 정점의 평균 수온은 10.4(9.1~11.3)°C 내외를 기록하여 수온이 4°C 전후 차이를 보였다 (Fig. 2a). 염분은 1월에 32.7~33.4, 2월에 33.8~34.7, 3월에 33.2~34.4를 보였으며, 2월의 내만 조사정점 1번

과 6번 정점의 평균 염분은 33.9(33.8~33.9) 내외였고, 조사정점 2번, 3번, 4번과 5번은 34.6(34.4~34.7) 내외로 0.7의 차이를 보였다 (Fig. 2b). 연안과 가깝고 수심이 얕은 정점 1과 6에서 조사시기와는 무관하게 낮은 수온과 염분을 보였다. 투명도는 3월에 0.8~2.0m의 값을 보여 전 조사 정점에서 낮은 투명도를 보였다. 조사 정점의 광 소멸 계수(Kd) 범위는 0.77~1.90이었는데, 조사 정점 1번, 5번과 6번의 광 소멸 계수는 1.5 이상의 값을 보였고, 정점 2번, 3번과 4번의 광 소멸 계수는 약 1의 값을 보였다.

영양염류 중 용존무기질소는 1월에 1.73~12.84 μM, 2

월에 6.83~9.62 μM, 3월에 4.88~9.41 μM로서 1월에는 정점 1에서 낮은 농도 분포를 보였다(Fig. 2c). 용존무기인은 1월에 0.07~0.67 μM, 2월에 0.39~0.48 μM, 3월에 0.24~0.38 μM로서 1월의 정점 1에서 다른 정점에 비하여 낮은 0.07 μM 농도를 보였다(Fig. 2d). 규산염은 1월에 4.93~18.29 μM, 2월에 10.40~13.20 μM, 3월에 9.34~12.12 μM로서 1월의 정점 1에서 다른 정점에 비하여 낮은 4.93 μM 농도를 보였다(Fig. 2e). Chl *a*는 1월에 0.49~9.14 μg L⁻¹, 2월에 0.41~1.09 μg L⁻¹, 3월에 0.46~0.86 μg L⁻¹로서 1월의 정점 1에서 다른 정점에 비하여 매우 높은 9.14 μg L⁻¹ 농도를 보였다(Fig. 2f). 염분과 용존무기질소와의 관계에서 1월의 정점 1을 제외하면, 상대적으로 저염분 조건에서 영양염 농도가 높게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다(Fig. 3).

총 부유 입자물질의 평균 농도는 1월에 33.2±12.9 mg L⁻¹, 2월에 21.1±1.8 mg L⁻¹, 3월에 17.8±3.1 mg L⁻¹로서 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 보였고, 입자유기물질의 평균 농도는 1월에 5.6±1.3 mg L⁻¹, 2월

에 2.6±0.1 mg L⁻¹, 3월에 2.8±0.3 mg L⁻¹로서 1월이 높고 2월, 3월은 비슷한 경향을 보였다.

입자유기탄소 및 용존유기탄소의 평균 농도는 1월에 각각 798±144 μg L⁻¹, 889±12 μg L⁻¹, 2월에 각각 662±40 μg L⁻¹, 818±25 μg L⁻¹, 3월에 각각 465±52 μg L⁻¹, 782±26 μg L⁻¹로서 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 보였으나, 용존 유기탄소의 농도가 높았고, 입자유기질소의 평균 농도는 1월에 65±15 μg L⁻¹, 2월에 24±6 μg L⁻¹, 3월에 0.6±0.1 μg L⁻¹로서 시간이 지남에 따라 점차 감소하여 3월에는 매우 낮은 값을 보였다. 입자유기탄소와 입자유기질소와의 평균 비 값은 158±96으로서 3월의 경우 입자유기질소 농도가 낮거나, 검출되지 않아 높은 비 값을 보였다. POC/Chl *a*의 평균 비 값은 983±83이고, DOC/Chl *a* 평균 비 값은 1,342±107을 보였다(Table 2). 이러한 시간적 변이와 함께 공간적 변이로서 정점 간 길에 미치는 해양 환경적 차이를 알아보기 위하여 김 양식 순기와 수확 시기를 고려하여 2월의 각 정점에 대한 수온, 염분, pH, DIN, DIP를 가지고 군집분석을 실시한 결과 지역적으로 뚜렷한 두 개의 정점군으로 구분할 수 있었다(Fig. 4).

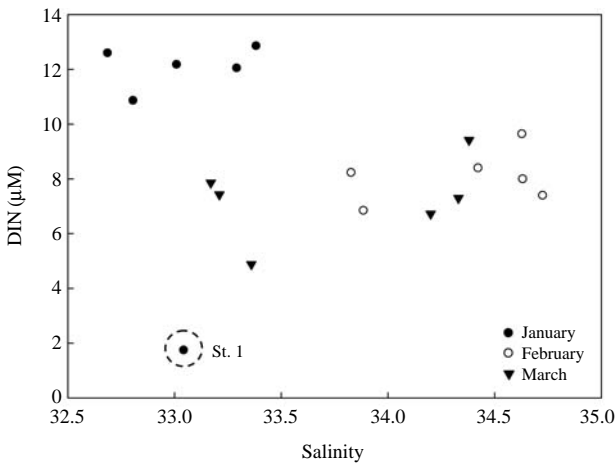


Fig. 3. Relationship between dissolved inorganic nitrogen (DIN) concentration and salinity in the surface water on the southwestern coast of the Korean peninsula.

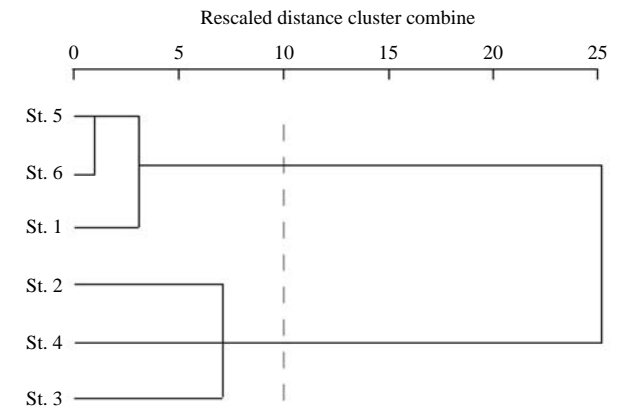


Fig. 4. Dendrogram showing the results of cluster analysis grouping the sampling stations.

Table 2. Monthly mean values of suspended particulate matter (SPM), particulate organic matter (POM), particulate organic carbon (POC), particulate organic nitrogen (PON), dissolved organic carbon (DOC), POC/PON, POC/Chl *a*, DOC/Chl *a* in the surface water on the southwestern coast of the Korean peninsula. Values represent means ± SE (n=12)

	Jan.	Feb.	Mar.	Avg.
SPM (mg L ⁻¹)	33.2±12.9	21.1±1.8	17.8±3.1	24.0±4.5
POM (mg L ⁻¹)	5.6±1.3	2.6±0.1	2.8±0.3	3.6±0.5
POC (μg L ⁻¹)	798±144	662±40	465±52	642±60
PON (μg L ⁻¹)	65±15	24±6	0.6±0.1	38±9.4
DOC (μg L ⁻¹)	889±12	818±25	782±26	829±16
POC/PON	14±2	36±8	959±310	158±96
POC/Chl <i>a</i>	953±197	1,166±129	830±57	983±83
DOC/Chl <i>a</i>	1,121±242	1,466±186	1,440±97	1,342±107

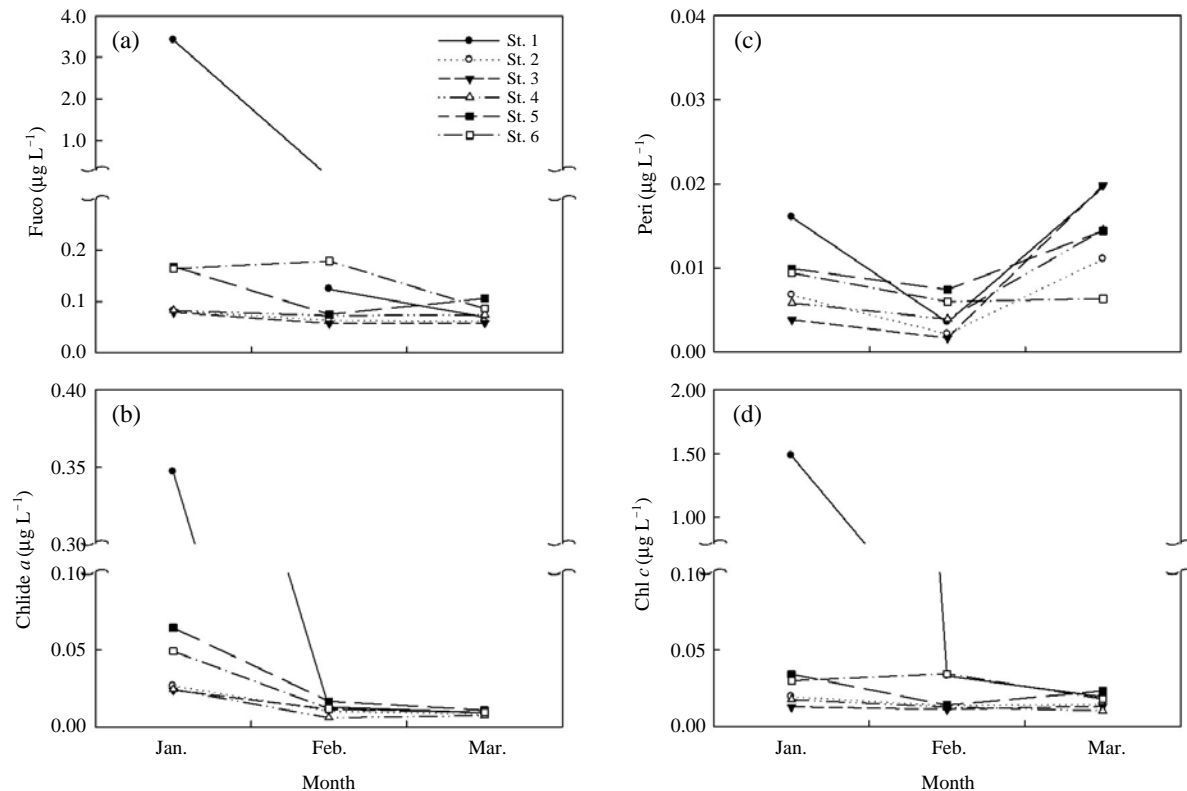


Fig. 5. Algal pigments fucoxanthin (Fuco; a), chlorophyllide *a* (Chlide; b), peridinin (Peri; c) and chlorophyll *c* (Chl *c*; d) in the surface water on the southwestern coast of the Korean peninsula.

2. 색소 조성과 농도

HPLC를 이용하여 측정된 표층해수의 조류색소는 chlorophylls 3종과 carotenoids 12종이 검출되었으며, Chl *a*의 분해산물인 pheophytin *a*와 chlorophyllide *a*가 검출되었다. Chlorophylls로는 Chl *a*, *b*, *c*가 검출되었고 carotenoids로는 fucoxanthin, alloxanthin, peridinin, zeaxanthin, diadinoxanthin, β -carotene 외 6종이 검출되었다. 남서해역에서 측정된 조류색소 조성에서는 규조류 (diatoms)의 marker 색소인 fucoxanthin이 1월에 $0.079 \sim 3.410 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월에 $0.057 \sim 0.179 \mu\text{g L}^{-1}$, 3월에 $0.058 \sim 0.106 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 조사 기간 내내 높은 점유율을 보였고, 특히 1월의 정점 1에서 $3.410 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 높은 값을 보였다 (Fig. 5a). Chl *a*의 노화에 의한 자연적 분해산물인 chlorophyllide *a*가 1월에 $0.024 \sim 0.347 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월에 $0.006 \sim 0.017 \mu\text{g L}^{-1}$, 3월에 $0.007 \sim 0.011 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 1월에는 전 정점에서 높고 3월에는 전 정점이 낮은 시간적 변이를 보였고, 특히 1월의 정점 1에서 $0.347 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 높은 값을 보였다 (Fig. 5b). 외편 모조류 (dinoflagellates)의 marker 색소인 peridinin은 1월에 $0.004 \sim 0.016 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월에 $0.002 \sim 0.007 \mu\text{g L}^{-1}$, 3월에 $0.006 \sim 0.020 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 조사 시기의 변이는 보이지 않았

다 (Fig. 5c). Fucoxanthin과 같이 규조류에 많이 나타나는 색소인 Chl *c*는 1월에 $0.013 \sim 1.484 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월에 $0.011 \sim 0.034 \mu\text{g L}^{-1}$, 3월에 $0.010 \sim 0.023 \mu\text{g L}^{-1}$ 이었고, 1월의 정점 1에서 $1.484 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 높은 값을 보였다 (Fig. 5d).

김 시료 중에 포함되어 있는 광합성 색소인 Chl *a*, phycoerythrin, phycocyanin, zeaxanthin, pheophytin *a*와 β -carotene의 농도를 분석한 결과, Chl *a*의 농도는 $1,173 \sim 8,124 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 로서 조사 정점 3, 4에서 높은 농도를 보였다. Phycoerythrin의 농도는 $3,281 \sim 10,076 \mu\text{g DW g}^{-1}$, phycocyanin의 농도는 $388 \sim 1,346 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 로서 정점 1번과 6번의 농도가 적었고, 특히 정점 2, 3은 phycoerythrin의 경우 약 $10,000 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 이었고, phycocyanin의 경우 약 $1,000 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 로서 1/10의 값을 차지하였다. Zeaxanthin의 농도는 $394 \sim 2,852 \mu\text{g DW g}^{-1}$, pheophytin *a*의 농도는 $268 \sim 3,431 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 과 β -carotene의 농도는 $152 \sim 890 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 이었다 (Fig. 6). 조사된 광합성 색소의 변수들을 \log_{10} 으로 변환하여 상관관계분석 (correlation analysis)을 수행한 결과를 Table 3에 나타내었다. 광합성 색소 중 Chl *a*는 β -carotene에 대하여 양의 상관관계 ($P < 0.001$)를 보였고, zeaxanthin은 Chl *a*와 β -carotene에 대해서 양의 상관관계 ($P < 0.01$)를 보였다. Phycoerythrin은

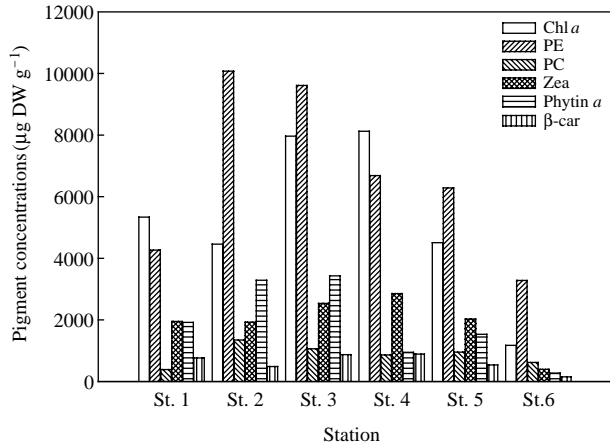


Fig. 6. Concentrations of chlorophyll *a* (Chl *a*), phycoerythrin (PE), phycocyanin (PC), zeaxanthin (Zea), Pheophytin *a* (phytin *a*) and β-carotene (β-car) in pigmentation of *Porphyra yezoensis* on the southwestern coast of the Korean peninsula.

Table 3. Pearson product-moment correlation coefficient for chlorophyll *a* (Chl *a*), Phycoerythrin (PE), Phycocyanin (PC), Zeaxanthin (Zea), Pheophytin *a* (Phytin *a*), β-carotene (β-car) in pigmentation of *Porphyra yezoensis*

	Chl <i>a</i>	PE	PC	Zea	Phytin <i>a</i>	β-Car
Chl <i>a</i>	1.000					
PE	0.691	1.000				
PC	0.276	0.845*	1.000			
Zea	0.981**	0.717	0.332	1.000		
Phytin <i>a</i>	0.757	0.812*	0.429	0.788	1.000	
β-Car	0.990***	0.600	0.147	0.969**	0.744	1.000

*0.01 < p < 0.05, **0.001 < p < 0.01, ***p < 0.001

Table 4. Ratios of chlorophyll *a* (Chl *a*), Phycoerythrin (PE), Phycocyanin (PC) and total photosynthetic pigment concentration (T) in pigmentation of *Porphyra yezoensis*

	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6
PE/Chl <i>a</i>	0.80	6.52	3.14	0.97	1.56	2.80
PC/Chl <i>a</i>	0.07	0.73	0.34	0.15	0.25	0.53
PE/PC	10.99	9.74	9.11	14.74	10.53	5.30
Chl <i>a</i> /T	0.36	0.16	0.28	0.38	0.30	0.20
PE/T	0.29	0.49	0.40	0.34	0.38	0.56
PC/T	0.03	0.06	0.04	0.05	0.05	0.10

phycocyanin과 pheophytin *a*에 대하여 약한 양의 상관관계 ($P < 0.05$)를 보였다.

조사된 총 광합성 색소 (T) 농도는 5,910~25,643 µg DW g⁻¹이었고, PE/Chl *a* 비율은 0.80~6.52, PC/Chl *a* 비율은 0.07~0.73, PE/PC 비율은 5.30~14.74을 보였다 (Table 4). 정점 1과 정점 6은 정점 2, 3에 비해 Chl *a*와 PE 농도가 낮았고, 총 광합성 색소 농도는 정점 1의 경우 14,671 µg DW g⁻¹, 정점 6의 경우 5,910 µg DW g⁻¹로

서 현저히 낮았다. 광합성 색소 농도의 비율에서 정점 1은 PE/Chl *a*, PC/Chl *a*, PE/T, PC/T에서 낮은 값을 보였고, 정점 6은 PE/PC 낮았으나, PE/T, PC/T에서는 높은 값을 보였다 (Table 4).

고찰

조사 해역의 해수유동 특성은 전형적인 반일주조 형태로 창조시 조약도 동쪽과 청산도 남동쪽으로부터 유입된 해수는 도암만으로 복상하는 일부 흐름을 제외하면 대부분 서향하여 진도 쪽으로 향하고, 일부는 노화도, 소안도, 보길도의 좁고 복잡한 수로들을 지나 서쪽으로 흘러 도암만 내측을 제외하면 대부분 유속이 빠르고 해수교환이 활발한 지역이다 (국립수산과학원 2012). 김의 성장기인 11월부터 3월까지의 성장 적수온은 5~8°C 범위 (강과 고 1977)이고, 적 염분은 21.7~32.5 범위 (Iwasaki 1965)인 것으로 나타났다. 그러나, 본 조사에서 2월 달 조사정점 1번, 5번과 6번 정점과 2번, 3번과 4번 정점의 수온이 4°C 전후 차이를 보였고, 2월 달 조사정점 1번과 6번 정점과 조사정점 2번, 3번, 4번과 5번은 0.7의 차이를 보여 수온 및 염분의 차이가 양식 김의 생리 생태에 영향을 미칠 것으로 판단된다 (Iwasaki 1965; 강과 고 1977; Tada *et al.* 2010). 조사해역의 광 소멸 계수 (Kd)가 1일 경우 1 m 깊이를 통해서 빛의 10%가 전달되고 광 소멸 계수가 2일 경우 1 m 깊이를 통해서 빛의 1%만이 전달되는데 (Kirk 1977), 조사 정점의 광 소멸 계수는 대체적으로 2.4 m 이하로 수심이 얕은 정점에서 Kd값이 1.55~1.60의 범위로 큰 것으로 나타났고, 20 m 이상의 수심이 깊은 정점에서는 0.77~1.15의 상대적으로 작은 값을 보여 김 양식이 표층에서 양식이 이루어 지지만 광 소멸 계수도 김 양식의 방법에 대하여 영향을 미칠 것으로 판단된다. 조사정점 1번과 6번은 수심이 2~2.4 m로서 지주식으로 김을 양식하고 있으며, 2~5번은 수심이 14~35 m로서 부류식으로 김을 양식하고 있다. 군집 분석에 의하여 2개의 뚜렷한 정점 군은 조사정점 1번, 5번과 6번, 조사정점 2번, 3번과 4번의 김이 양식되고 있는 지역적인 차이로 보여주며, 동시에 해양환경적인 요인이 크게 작용하는 것으로 판단된다.

일반적인 연안 역에서의 영양염류 기원은 외양수의 유입, 육지에서의 유기물 부하, 내부생산에 의한 영양염류 감소와 퇴적물에서의 영양염 용출의 4가지 관점에서 찾아 볼 수 있다 (Tada *et al.* 2010). 본 조사해역 중 1월 조사정점 1번의 경우 영양염을 에너지원으로 이용하는 식물플랑크톤인 규조류의 이상 번식으로 Chl *a*가 9.18

$\mu\text{g L}^{-1}$, 용존무기질소가 $1.73 \mu\text{M}$, 용존무기인이 $0.07 \mu\text{M}$, 규산 규소가 $4.9 \mu\text{M}$, fucoxanthin이 $3.41 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타나 내부생산에 의한 영양염류 소비량의 증가 현상을 보였다 (국토해양부, 2010). 또한, 보존성 물질인 염분과 비 보존성 물질인 용존무기질소와의 관계에서 낮은 염분의 1월에 용존무기질소가 높은 이유는 하천으로부터 유입된 담수 혹은 조석작용에 의하여 빠져 나온 공극수 유입 때문인 것으로 보인다. 특이하게 1월 정점 1은 낮은 용존무기질소 농도를 보였다. 이는 식물플랑크톤에 의한 영양염류가 소비되었기 때문인 것으로 사료된다. 실제 정점 1에서 같은 시기에 Chl *a* 농도가 다른 정점들에 비해 상당히 높았다. 일본 세토 내해의 용존무기질소가 $3 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하일 경우 김의 황백화 현상이 일어날 수 있다는 연구결과를 바탕으로 조사해역이 지속적으로 영양염류 농도의 저하가 나타날 경우 본 조사 해역에서도 김의 황백화 현상이 나타날 수도 있다 (Tada *et al.* 2010). 국립수산과학원에서 수행한 2005년과 2008년 한국해양환경 조사연보에는 본 조사 정점 1과 유사 지역에서 2월에 식물플랑크톤의 이상증식으로 판단되는 높은 Chl *a* 농도를 보이고 있다 (국립수산과학원 2006, 2009). 조사 정점 1에서 매년 연속적으로 식물플랑크톤의 이상 증식이 나타나지는 않지만 차후 연구의 필요성이 있을 것으로 판단된다. 조사 시기 동안 총 부유 입자물질 중 입자유기물질의 농도가 15% 정도로 매우 낮은 값을 보여 대부분 입자유기물질로 구성되어 있음을 알 수 있다. 따라서, 그 외의 조사 정점은 육상, 외양, 양식과정 등으로 인한 유기 쇄설 입자의 유입이나 얇은 수심에 기인하는 퇴적물의 재 부유에 대한 영향을 받을 것으로 추측된다 (이 등 2001).

입자유기물질 중 한 성분의 다른 성분에 대한 비 값은 입자유기물질의 기원을 설명할 수 있는데, POC/Chl *a* 비는 입자유기물질의 조성차이에 대하여 유용하게 이용된다 (Zeitzschel 1970; Berg and Newell 1986). POC/Chl *a* 비가 100 이하는 입자유기탄소의 대부분이 식물플랑크톤에 주로 유래하고, 높은 값일수록 유기 쇄설입자 (non-living detritus)의 점유율이 높아진다는 것을 나타낸다. 김 양식장의 Chl *a*가 높은 시기인 1월 조사정점 1번의 POC/Chl *a* 비는 73으로서 식물플랑크톤의 기여가 높다는 것으로 나타났지만, 1월의 다른 정점과 2월, 3월의 조사시기에는 POC/Chl *a* 비가 600 이상으로서 입자유기탄소에 대한 높은 유기 쇄설입자의 기여를 시사해 준다 (Menzel and Ryther 1964). 일반적으로 식물플랑크톤의 전형적인 C:N 비 값은 6~7로 알려져 있으며, C:N의 비 값이 7 이상은 입자유기물질의 많은 부분이 유기 쇄설 입자라는 것을 나타내고 그것보다 낮은 값은 높은 생물 기여를 나타낸다. 따라서, 본 연구에서의 C:N의 비 값

중에서 1월 조사정점 1번의 7.4를 제외하면 17 이상으로서 입자유기물질 상당부분이 유기 쇄설입자로 이루어져 있음을 알 수 있다 (Fabiano *et al.* 1996).

남서해역에서 측정된 해수의 조류색소 조성은 규조류 (diatoms)의 marker 색소인 fucoxanthin이 높은 점유율을 보였으나, 와편모조류 (dinoflagellates)의 marker 색소인 peridinin은 조사 시기 동안 변이를 보이지 않아 겨울철 저 수온시기 남서해역의 식물플랑크톤이 주로 규조류로 구성되어 있는 것을 잘 나타내 주었다 (국토해양부 2010).

해조류의 색소분석은 다른 것에서 볼 수 없는 특별한 색소와 색소의 혼합물이 함유되어 있다 (Dawes 1997). 홍조식물인 김은 보조색소로 피코빌린계 색소인 phycoerythrin과 phycocyanin을 가지는데, 이 (1981)가 제시한 방사무늬김의 phycoerythrin과 phycocyanin 각각의 광합성 색소 농도 $34,500 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 과 $17,800 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 보다는 낮은 값을 보였고, 황 등 (2010)이 제시한 참김의 phycoerythrin과 phycocyanin 각각의 광합성 색소 농도 $1,404 \sim 6,521 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 와 $3,149 \sim 3,517 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 와도 차이를 보였다. 양질의 김이 가지는 대체적인 광합성 색소 농도 중 Chl *a* 농도는 $5,000 \sim 10,000 \mu\text{g DW g}^{-1}$, phycoerythrin 농도는 $24,000 \sim 35,000 \mu\text{g DW g}^{-1}$, phycocyanin 농도는 $15,000 \sim 23,000 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 이라고 하였다 (강과 고 1977). 본 조사 결과 phycoerythrin과 phycocyanin 각각의 광합성 색소 농도 $3,281 \sim 10,076 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 와 $388 \sim 1,346 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 로서 차이를 보였으나, 광 촉매 역할을 하는 Chl *a*에 에너지가 전달됨으로써 유효하게 광합성에 관여할 수 있다 (Dring 1983; Dawes 1997). 카로티노이드계의 zeaxanthin과 β -carotene 농도는 각각 $394 \sim 2,852 \mu\text{g DW g}^{-1}$, $152 \sim 890 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 로 이것이 Chl *a*로 전달되기도 하지만 Chl *a*가 광산화되는 것을 보호해 주는 역할을 한다 (Dring 1983; Taiz and Zeiger 1991). Pheophytin *a*의 농도는 $268 \sim 3,431 \mu\text{g DW g}^{-1}$ 로 산 가수분해에 의하여 Chl *a*에서 pheophytin *a*로 전환될 때 식물 산의 용해나 확산이 높은 수분활성에서 주도적으로 일어난다 (이와 최 1973). 대체적으로 조사지역의 수심이 얇은 지주식으로 양식되는 방사무늬김 엽체의 색소 농도보다 수심이 깊은 부류식으로 양식되는 방사무늬김 엽체의 색소 농도가 높은 값을 보이고 있어, 해양 환경적 차이가 김 엽체의 색소 농도에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

적 요

서식 환경에 따른 양식 김의 종류 및 광합성 색소 조성 농도에 대하여 2011년 1월부터 3월까지 김 양식이

이루어지고 있는 남서해역에서 조사를 하였다. 수온의 범위는 3.0~11.3°C이었고, 염분의 범위는 32.7~34.7으로 연안과 가까운 정점 1과 6에서 낮게 나타났다. 해수 중 DIN의 농도 범위는 1.73~12.84 μM, DIP의 농도 범위는 0.07~0.67 μM이었고, 규산염의 농도 범위는 4.93~18.29 μM이었다. 해수 중 Chl *a* 농도 범위는 0.41~9.14 μg L⁻¹로서 1월의 정점 1에서 가장 높았다. 해수 중 조류색소 조성은 규조류(diatoms)의 marker 색소인 fucoxanthin이 0.06~3.41 μg L⁻¹로 우점하였고, 정점 1에서 3.41 μg L⁻¹로 1월에 가장 높았다. 용존 무기질소 농도는 모든 정점에서 낮은 염분을 보이는 1월에 높았으나, 정점 1은 용존 무기질소 농도는 낮았다. 김 엽체 색소 중 Chl *a*, PE 및 PC의 농도는 각각 1,173~8,124 μg DW g⁻¹, 3,281~10,076 μg DW g⁻¹, 388~1,346 μg DW g⁻¹로서 조사 정점 2, 3에서 높은 농도를 보였다. 김 엽체의 색소 농도는 지주식인 모무늬돌김과 방사무늬김이 혼재되어 양식되는 정점 1과 6보다 부류식인 방사무늬김만 생산되는 정점에서 높았고, 방사무늬김만 생산되는 정점에서는 정점 2와 3에서 높았다. 따라서, 김 엽체의 색소 농도는 양식 방법과 해양 환경적 요인에 의하여 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 국립수산물과학원(RP-2012-ME-041)의 지원에 의해 운영되었으며, 무명의 심사자의 지적에 의해 본 논문의 질이 향상되었으며 이에 깊이 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 강제원, 고남표. 1977. 해조양식. 대한교과서주식회사. 태화출판사. 부산. 294pp.
- 국립수산물과학원. 2006. 한국해양환경 조사연보 2005. 10: 400pp.
- 국립수산물과학원. 2009. 한국해양환경 조사연보 2008. 13: 400pp.
- 국립수산물과학원. 2012. 남·서해안에서의 해양생태계 변화에 따른 김 양식장 적정 수용량 등 조사. 2011년도 국립수산물과학원 사업보고서. 86pp.
- 국토해양부. 2010. 해양생태계 기본조사 남해-서부. 842pp.
- 박미옥, 문창호, 김석운, 양성렬, 권기영, 이용우. 2001. 2000년 추계 섬진강 하구에서 염분경사에 따른 식물플랑크톤의 종조성: HPLC와 현미경 자료 비교. 한국조류학회지. 16: 179-188.
- 이강호, 최호연. 1973. 건 해태(김) 저장시의 수분활성과 색소분해반응. 한수지. 6:27-36.
- 이남수. 2010. 김의 소비패턴에 관한 연구. 한국식품유통학회지. 27:1-23.
- 이태녕. 1981. 해조류의 광합성 색소에 대한 분광학적 연구. 서울대학교 사범대학. 50pp.
- 이필용, 강창근, 최우정, 양한섭. 2001. 고성만과 강진만에서 현탁물 섭취자에 유용한 입자물질 양과 질의 계절 변동. 한수지. 34:340-347.
- 장선덕, 진 평, 박기영. 1983. 양식 김의 광합성에 미치는 수온, 염분 및 부니의 영향. 한수지. 16:335-340.
- 해양수산부. 2005. 해양환경 공정시험방법. 400pp.
- 황미숙, 김승오, 이영순, 박은정, 김성철, 하동수, 공용근, 백재민, 최한구. 2010. 참김(*Porphyra tenera* Kjellman) 색소 및 형태 변이체의 순계주 분리 및 특성. 한수지. 43:495-502.
- 황미숙, 이인규. 2001. 한국산 홍조식물 김속(*Porphyra*)의 분류. Algae 16:233-273.
- 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.
- Dawes CJ. 1997. Marine Botany. Second Edition. John Wiley and Sons Inc. New York. 480pp.
- Dring MJ. 1983. The Biology of Marine Plants. Edward Arnold, Baltimore, Maryland. 208pp.
- 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.
- 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.
- Kirk JTO. 1977. Use of a quanta meter to measure attenuation and underwater reflectance of photosynthetically active radiation in some inland and coastal southeastern Australian waters. Aust. J. Mar. Fresh. Res. 28:9-21.
- Lobban CS and PJ Harrison. 1994. Seaweed ecology and physiology. Cambridge University Press. Cambridge. 366pp.
- Menzel DW and JH Ryther. 1964. The composition of particulate organic matter in the western north Atlantic. Limnol. Oceanogr. 9:179-186.
- 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.

Taiz L and E Zeiger. 1998. Plant Physiology. 2nd ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc. Publishers.

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.

Zeitzschel B. 1970. The quantity, composition and distribution of suspended particulate matter in the Gulf of California. Mar. Biol. 7:305-318.

Received: 30 July 2012

Revised: 3 September 2012

Revision accepted: 4 September 2012