한국환경과학회지 제17권(제10호), 1155~1167, 2008
Journal of the Environmental Sciences

CHEMTAX 활용한 가막만 식물플랑크톤 군집조성

오현택 · 김다정 · 이원찬 · 정래홍 · 홍석진 · 강양순* · 이용우** · Charles Tilburg***
국립수산과학원 환경관리과, *국립수산과학원 해양생태과, **부산대학교 생물학과,
***Univ. New England Dept. Chemistry & Physics
(2008년 7월 4일 접수; 2008년 10월 2일 수정; 2008년 10월 24일 채택)

Composition of Phytoplankton in Gamak Bay by CHEMTAX Analyses

Hyun Taik OH, Da Jung Kim, Won Chan Lee, Rae Hong Jung,
Suk Jin Hong, Yang Sun Kang*, Yong-Woo Lee** and Charles Tilburg***
National Fisheries R&D Institute, Marine Environmental Management Division, Busan 619-707, Korea
**NFRDI, Marine Ecology Division, **Busan National Univ. Dept. Biology, Busan 609-735, Korea*
****Univ. New England, Dept. Chemistry & Physics, 04002, ME 11 Hills Beach Road, U.S.A.*
(Manuscript received 4 July, 2008; revised 2 October, 2008; accepted 24 October, 2008)

Abstract

Chlorophyll *a* (chl *a*) has been used as an indicator for phytoplankton biomass in pelagic ecosystems due to the relative ease of measurement and selectivity for autotrophs in mixed plankton assemblages. However, the use of chl *a* as an indicator for phytoplankton biomass is restricted due to its inability to resolve taxonomic differences of phytoplankton and the highly variable relationship of chl a with phytoplankton. Here, we describe the analysis of High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) photosynthetic pigment data using CHEMTAX, which is a matrix factorization program that uses chemical taxonomic indices (phytoplankton carotenoids) to quantify the abundance of phytoplankton groups. Compared to direct microscopic counting that can distinguish species within broad groups, the resolution of taxonomic groups by CHEMTAX is generally coarse. It can only distinguish between diatoms, dinoflagellates, cryptophytes, cyanobacteria, chlorophytes, prasinophytes, and haptophytes. However, CHEMTAX analysis is much faster and less expensive than microscopic counting methods. HPLC pigment observations were taken in the spring, summer, fall, and winter in 2005~2006 within Gamak Bay, South Korea. CHEMTAX results revealed that diatoms were the dominant taxonomic group in Gamak Bay. In inner Gamak Bay, the ratio between diatoms and cryptophytes was 75~80%, and the ratio between dinoflagellates and cryptophytes was 10~15%. In outer Gamak Bay, the ratio between diatoms and cryptophytes was 85~90%, and the ratio between dinflagellates and cryptophytes was only 1~5%. The population structure was seasonal. Relative diatom populations were less in the summer than the winter season.

Key Words : Gamak Bay, Pigments, HPLC, CHEMTAX

1. 서 론

우리나라 남서해안은 영양염류의 유입 및 먹이생물의 번식이 활발하여 각종 어패류가 산란 및 서식

Corresponding Author : Hyun Taik OH, National Fisheries R&D Institute, Marine Environmental Management Division, Busan 619-707, Korea
Phone: +82-51-720-2253
E-mail: ohtek@nfrdi.go.kr

하기에 좋은 지형적 조건과 어장환경을 지니고 있다. 특히, 남해안의 중앙에 위치하고 있는 가막만은 독특한 지형과 해양수리학적 조건 때문에 3개의 수괴가 존재하며 기초 생산력이 매우 커 다양한 생물의 서식 및 양식어업에 매우 좋은 지형적 조건과 어장 환경을 갖고 있다[1]. 이로 인해 현재 가막만의 굴 양식은 전국 굴 생산량의 30% 내외를 생산하고 있는 황금어장으로, 굴 양식을 비롯한 패류생산이 활발하게 이뤄지고 있다. 그러나 최근 가막만 내 양식밀도 증가와 육상의 개발압력, 부영양화 현상으로 인한 적조발생, 장기적인 사용으로 인한 어장 노화 등으로 인해 해양환경 악화가 우려되고 있으며, 이를 해결하고자 해양수산부는 2001년도에 환경보전해역으로 지정하여 해역특성을 반영한 최적의 관리방안을 마련하고 있다(Fig. 1.).

chlorophyll을 주로 갖고 있는 해양생태계의 기초생산자는 무기물을 재료로 하여 유기물을 합성할 수 있는 생물 또는 생물군을 말하며, 생태계에서 생물생산의 출발점이다. 생산자는 광합성색소인 엽록소(chlorophyll)를 가진 녹색식물(고등식물과 남조류를 포함한 조류)이 주가 되며, 이들은 태양에너지를 받아들여 이산화탄소와 물로부터 탄수화물을 합성한다. 가막만 굴 양식에 있어 이러한 기초생산자는 양식굴의 비만도에 영향을 직접 미치게 되고, 빈영양상태가 지속되게 되면 양식굴의 비만저조현상이 나타나게 된다. 특히 굴의 비만에 중요한 시기라 생각되는 수온 하강기에 먹이발생의 부진은 해역에 빈영양상태를 가중시키는 것으로 추정되었다.

미세조류는 조간대의 다양하고 풍부한 생태계의 주된 기초생산자이며, 조간대 환경에서 하구역 먹이 그물망에 대한 탄소 공급원으로 중요한 역할을 한다[2,3]. 해양내 기초생산자인 chl *a*로의 현존량을 파악하기 위해서 흡광법과 형광법이 사용되었으며, 이런 분석법은 chl *a*의 분해산물과 보조색소들의 흡광과 형광 밴드의 중복에 의해서 과소 또는 과대평가되어질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)를 이용하여 분석한 식물플랑크톤 분류군의 marker 색소에 근거하여 종을 분류하고 그 결과를 비교하고 있다[4]. 이러한 chromatogram을 이용해서 chlorophylls와 chlorophylls의 분해산물 및 cartenoids의 분석결과를 통해 식물플랑크톤의 현존량, 군집조성, 그리고

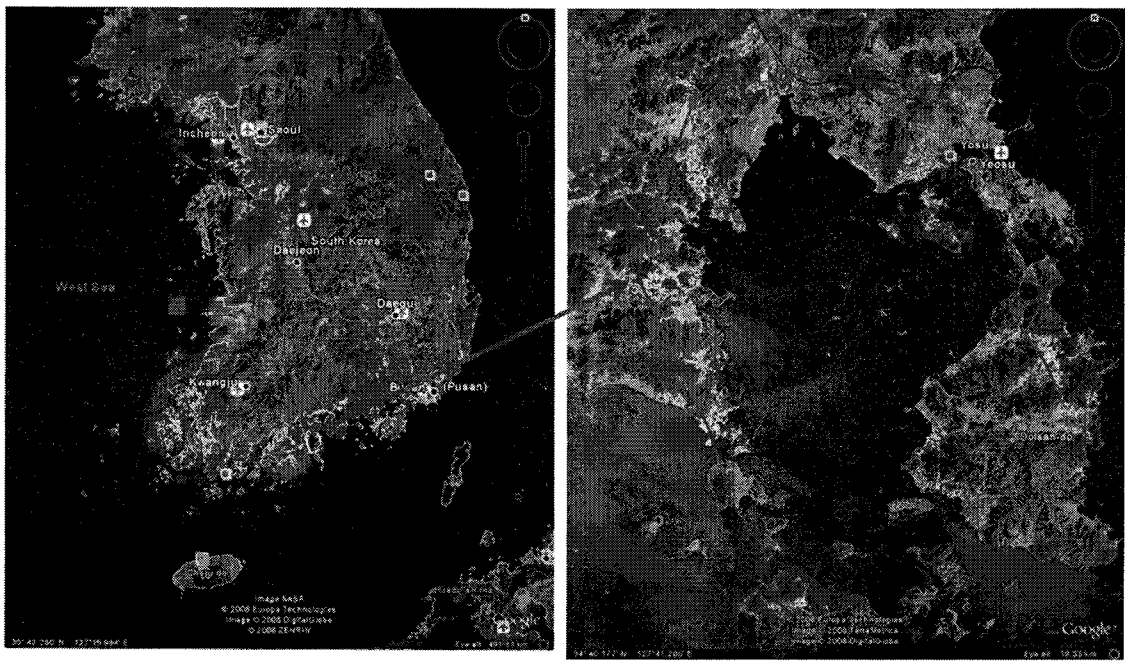

Fig. 1. Overview of location of Gamak Bay and marine environmental reservation area near Gamak Bay.

식물플랑크톤의 생리적 상태를 파악하는데 활용되어 왔다.

지금까지 수서 및 저서 미세조류의 군집조성을 분류하고 개체수를 파악하는 데에는 주로 현미경 관찰이 이루어져 왔다. 그러나 이러한 현미경 관찰은 정확한 동정기술과 상당한 시간을 필요로 하며, 특히 초미세 조류를 동정하는 데에는 세포 크기로 인해 어려움이 따르게 된다. 이러한 문제 해결을 위해서 1990년대 개발된 CHEMTAX[5]는 HPLC를 통해 정량, 정성 분석된 색소자료를 이용하여 군집조성 연구를 하는데 사용되고 있다. 본 연구에서는 가막만의 저서미세조류 특성과 CHEMTAX를 적용한 식물플랑크톤의 종 조성 특성을 살펴보고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사시기 및 해역

본 연구는 2005년 2월부터 2006년 11월까지 여수 가막만에서 해수 및 퇴적물 24개 정점을 선정하여 현장관측 및 채수, 채집을 하여 계절별 조사를 수행했다. 해수의 경우 수온, 염분, DO, pH는 다기능 수질측정기로 관측하였고, 부유물질, 유기물(COD, POC, DOC), 영양염(질소, 인)은 해양환경공정시험방법[6]에 따라 분석하였다. 퇴적물 환경인자인 입도, 유기물(COD, TOC, TN)은 해양환경공정시험방법으로 분석하였으며, 해수와 퇴적물의 광합성색소는 HPLC를 이용하여 정량하였다. 본 연구는 국립수산과학원에서 수행하는 국가해양환경측정망과는 별개로 수행되었으며 비교를 위한 국가해양환경측정망 가막만 2번 정점(34° 41' 22"N, 127° 41' 18"E) 은 G18 정점과 인접하며, 가막만 3번 정점(34° 37' 17"N, 127° 41' 25"E)은 G7번 정점과 인접한 위치에 있다(Fig. 2.).

2.2. 색소 분석 방법

식물플랑크톤의 chlorophyll 계열과 수층별 빛에너지의 효율적인 흡수를 위한 보조색소 carotenoid의 측정을 위해 HPLC 시스템으로 분석하여, chlor-

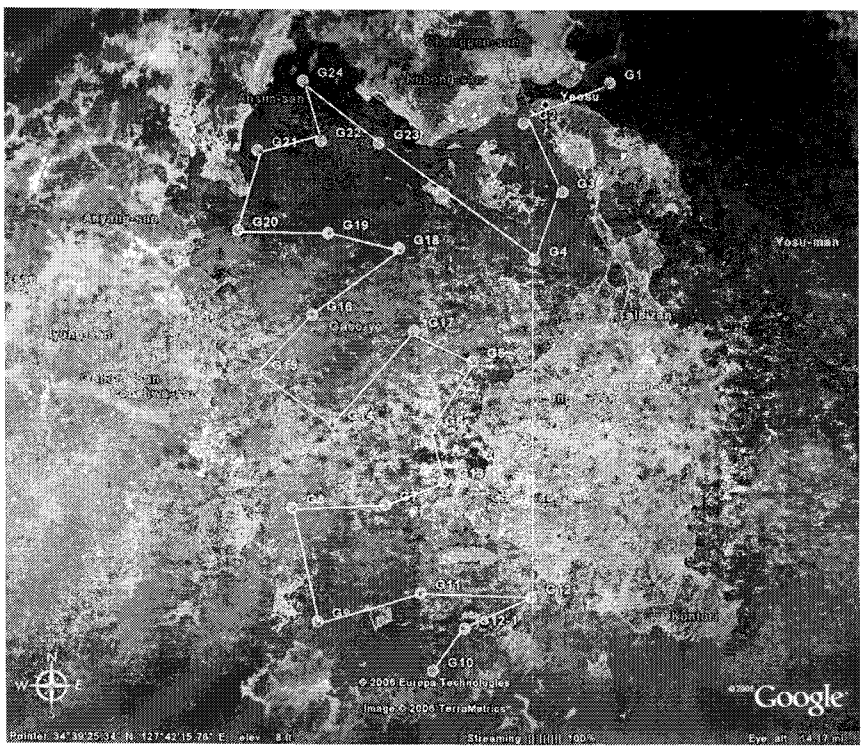

Fig. 2. Overview of sea water and sediment sampling stations in Gamak Bay (2005~2006). Only G12-1 is for the sediment sampling.

ophyll *a*, *b*, *c* 그리고 chlorophyll *a*의 분해산물인 phacophytin *a*, chlorophyllide *a*, 보조색소인 carotenoid 12종을 측정하였다. HPLC는 waters 2690을, detector는 absorbance detector (waters 2487)를 사용하여 436 nm에서 분석하였으며, photodiode array detector(waters 996)로 보정을 하였다. Column은 Rexchrom-S5-100-ODS를 사용하였으며, solvent A(MeOH 80%, 0.5M Ammonium Acetate 20%), solvent B(Acetonitrile 87.5%, H_2O 12.5%), solvent C(Ethyl Acetate 100%)의 용매를 사용하여 gradient 방법으로 분석하였다.

해수중의 식물플랑크톤의 광합성 색소 분석을 위한 해수는 연안의 경우 500~1000 mL, 외양의 경우 1~2 L를 채수하여 47 mm GF/F 여과지로 여과한 후 여과지는 알루미늄 호일로 싸서 드라이아이스(-78.5℃) 또는 액체질소(-197℃)에 넣어 냉동시켜 저장 후 실험실로 운반하였다. 즉시 분석이 불가능할 경우는 -70℃의 드라이아이스에 보관하였다. 여과지를 10 mL culture tube에 넣고 100% acetone 5 mL을 넣고 내부표준물질 canthaxanthin을 50 μL 첨가한다. 이때, 여과지를 시험관에 넣고 처음에는 3 mL의 아세톤과 canthaxanthin을 넣어주고, 추출기간 중 분쇄기를 이용하여 여과지를 분쇄할 때 분쇄기에 묻은 여과지를 씻어주면서 나머지 2 mL의 아세톤을 넣어주었다. 초음파 분쇄를 5분정도 실시하고, -20℃의 냉암소에서 24시간 추출시켰다. 24시간의 추출기간중에 분쇄기를 이용하여 여과지를 분쇄하여, 2000 rpm에서 10분동안 원심분리하여, 상등액 1 mL을 취하여 300 μL의 HPLC grade water와 vial에 넣은 후 잘 섞어 HPLC 100 μL loop에 주입하여 분석하였다(Fig. 3.).

퇴적물에서의 저서미세조류의 광합성색소 분석을 위해서는, 채취된 표층 퇴적물을 냉동시켜 동결건조시킨 다음 건중량을 측정한다. 측정된 퇴적물을 culture tube에 넣고, 100% acetone 7 mL을 넣고, 100 μL의 내부표준물질인 canthaxanthin을 첨가한 뒤 퇴적물이 acetone에 잘 섞이도록 앞뒤로 잘 흔들어준 뒤, 초음파 분쇄를 10분정도 실시한 후, -20℃의 냉암소에서 24시간 추출시킨다. 24시간의 방치 후 2000 rpm에서 10분 동안 원심분리를 하여, 상등액을 0.45 ㎛ PTFE filter로 여과하였다. 이 중 1 mL을 취해 300 μL의 HPLC grade water와 함께 vial에 넣은 후 잘 섞어 HPLC 100 μL loop에 주입하여 분석하였다. Chromatogram의 peak에 대한 동정은 표준색소의 retention time과 한국미세조류은행으로부터 분양받은 단일종 미세조류들로부터 추출한 색소의 retention time과 비교하여 결정하였다.

2.3. 통계적인 분석

CHEMTAX (CHEMical TAXonomy)는 chl *a*로에 대한 각 식물플랑크톤의 Class별 기여도를 구하기 위해 Mackey 등[5]에 의해 개발되었다 (Fig. 4.) 이는 연구해역의 샘플에서 검출된 식물플랑크톤 광합성색소들이 특정조류에만 나타나는 Marker 색소인 점을 착안하여, 해당 종의 분포 특성을 파악하는데 활용된다. 이들 Class별 식물플랑크톤이 가진 주요 광

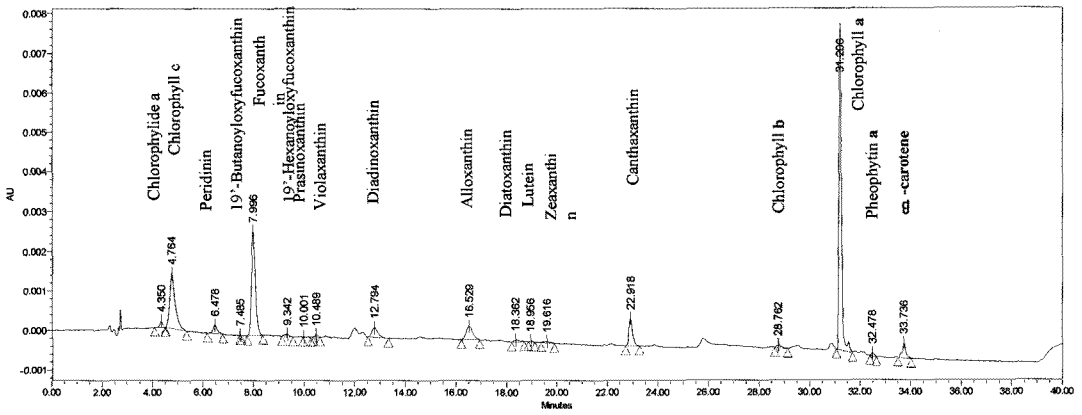

Fig. 3. HPLC retention time of each pigments and canthaxanthin.

	perid	19buthf	fucox	18hexfu	neox	prasinox	violax	allox	lutein	zeax	chl_b	chl_a
Prasinophytes_1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.15068	0.31507	0.06164	0.00000	0.00877	0.00000	0.94521	1.00000
Dinoflagellates	1.06329	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
Cryptophytes	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.22917	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
Haptophytes_N	0.00000	0.00000	0.00000	1.70588	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
Haptophytes_S	0.00000	0.24528	0.59491	0.53774	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
Chlorophytes	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06316	0.00000	0.05489	0.00000	0.20301	0.00902	0.26316	1.00000
Cyanobacteria_1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.34783	0.00000	1.00000
Diatoms	0.00000	0.00000	0.75540	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000

Fig. 4. Initial pigment data of phytoplankton class for Pre CHEMTAX Program.

합성색소는 HPLC 자료와 현미경적 자료 분석에 의해 구분되어진바 있으며[4], 본 연구에서는 이 자료를 활용해 식물플랑크톤과 저서미세조류를 정성 분석하였다. 본 연구에서는 종에 따라 구분되어지는 색소만을 사용하며, 이를 chl *a*와의 비로 나타낸 값을 Pre CHEMTAX Program에 사용하였으며, 식물플랑크톤의 종은 총 8가지로 한정해서 나타냈다. 모델의 초기값으로 작용하게 되는 식물플랑크톤이 갖고 있는 색소의 비 값은 각 연구해역을 중심으로 보다 개선되어야 하며, 이를 위해서 개별 플랑크톤에 대한 분리 및 배양후 생체량에 포함된 색소의 양과 비에 대한 연구 수행이 요구된다.

CHEMTAX는 초기 색소 비를 문헌 연구등을 통해서 계산하기에 국내 미세조류관련 연구자료의 질과 양에 비례하여 계산결과가 개선될 소지가 있다. Matlab® - Version 6.5 의 계산 알고리즘 개선과 반복횟수 등의 조정에 따라 계산시간이 단축될 수 있다[7]. 본 연구에 사용된 CHEMTAX의 가정으로는 ① phytoplankton은 색소의 비를 기본으로 하여 구분되어지고, ② 색소의 비는 정점간, 연직간 일정한 값을 사용하며, ③ 색소비에 관한 초기값은 특정 종에 의해서 지배되어지는 현장값으로 유추된 것이며, ④ 색소분석에 관한 오류는 최소화되었다는 것 등이 있다. 이러한 가정에 비해 CHEMTAX의 장점으로는 개별적인 바이오마커를 필요로 하지 않으며, 모든 크기, 형태, 종류의 Cells에 적합하다는 것이다. 사용되는 'Pigment classes'는 'Taxonomic classes'와 동일하지 않으며, 색소비에 대해서 추가적인 정보를 얻을 수 있으며, 군집 구조에 대한 이해를 돕는다[8]. 반면, prasinophytes와 chlorophytes간의 겹치는 초기값에 대한 구분이 어려우며, haptophytes와 prasinophytes의 경우에는 다른 색소의 비를 나타내는 국지적인 특성을 반영하기 어려운 점이 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수서 및 저서 환경 특성

해양수질은 1980년대 중반부터 1990년대 말까지 생활하수를 비롯한 육상기인 오염원과 양식에 의한 자가 오염원에 의한 오염이 심화되었으나 2000년 이후 개선되고 있는 상태이다[9]. 최근 5년간(2001~2005년) 해양수질현황을 보면, 용존산소는 평균 8.72 mg/L로 I 등급을 보이고 있으며, 화학적 산소요구량은 평균 1.57 mg/L로 II등급을 유지하고 있다(Fig. 5.).

국립수산과학원에서 가막만 해양환경조사를 위해 2005~2006년에 걸쳐 계절별로 해양환경에 대한 조사를 수행했다. COD 농도 분포는 조사기간 동안 0.0~3.6 mg/L(평균 1.7 mg/L)범위였고, 평균농도는 2

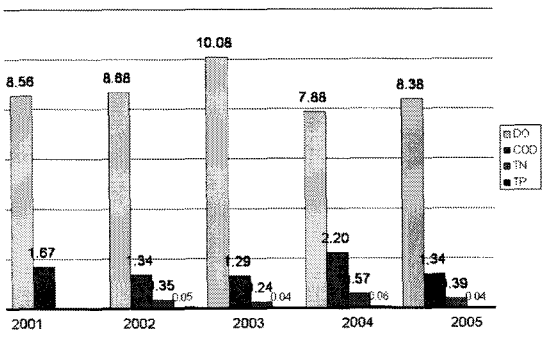

Fig. 5. Water quality (DO, COD, TN, TP) in Gamak Bay (2001~2005).

월 1.3 mg/L, 5월 1.9 mg/L, 8월 1.8 mg/L이었으며 큰 농도의 변동이 없었으며, 공간적으로는 만 북서측과 남측에서, 다소 높은 값을 보였고 만 중앙부에서 다소 낮게 나타났다(Fig. 6.). 만 북서측은 만 중앙역에 비해 수심이 깊어지고, 해수교환이 약해지는 곳에 해당하며 여름철 육상으로부터 기인한 오염물질에 의한 수질악화가 반복되는 해역이다. 만 중앙역의 우측부근에는 무술목해역에 해당하는데, 이곳은 무술목 둑 설치이후 해수교환이 불량해지고, 인근 저수시설로부터 오염된 물질이 유입되고 있어 수질악화가 빈번히 발생하는 해역이다. 게다가, 하수처리장이 가동되어 방류되는 방류수의 경우 무술목 앞으로 모여들 것으로 여겨져 수질악화가 심히 우려되는 해역에 해당한다.

DOC의 농도 분포는 조사기간 동안 0.2~3.9 mg/L (평균 1.5 mg/L) 범위였으며, 8월에 평균농도가 1.2 mg/L로 가장 낮은 농도를 보였고, 공간분포 경향은 COD와 유사하였다. DIN의 농도 분포는 조사기간 동안 0~0.265 mg/L(평균 0.032 mg/L) 범위였고, 평균농도는 2월 0.018 mg/L, 5월 0.048 mg/L, 8월 0.032 mg/L로 5월이 가장 높았다. DIP의 농도 분포는 조사기간 동안 0~0.109 mg/L(평균 0.007 mg/L) 범위였고, 평균농도는 2월 0.007 mg/L, 5월 0.008 mg/L, 8월 0.006 mg/L로 시기별로는 큰 변동은 없었다(Fig. 7.).

퇴적물의 COD 농도 분포는 조사기간 동안 4.4~21.6 mg/g dry(평균 13.1 mg/g dry) 범위였고, 동계에서 하계로 갈수록 농도가 증가하는 경향을 보였으며, 만 중부수역이 낮은 농도 분포를 보인 반면, 북부 내만역이 높은 농도를 보였다. 퇴적물의 오염

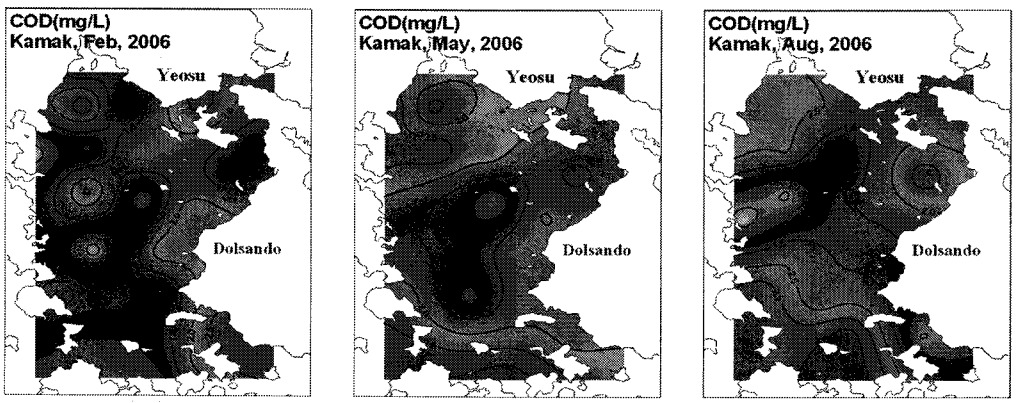

Fig. 6. COD distribution in sea water in Feb. (left), May (center), Aug. (right), 2006.

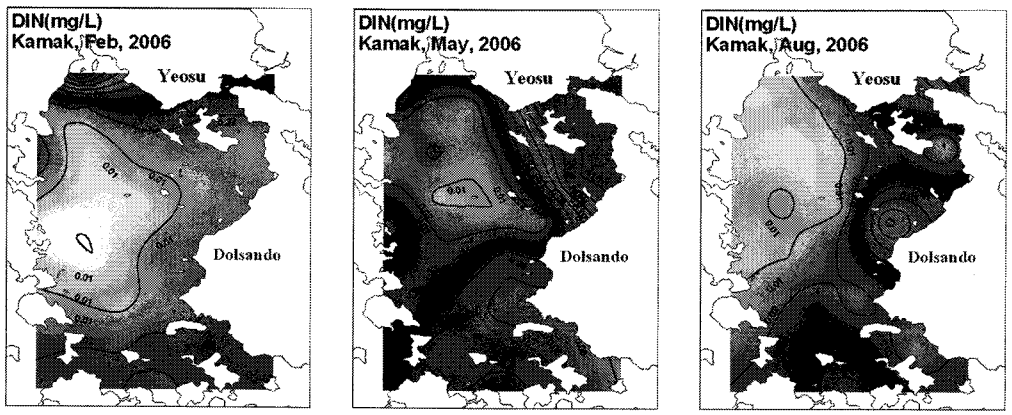

Fig. 7. DIN distribution at the surface water in Feb. (left), May (center), Aug. (right), 2006.

도 역시 만 북서내만역의 조류소통 불량으로 인해서 오염물질이 정체되는 특성을 반영한 것으로 보이며, 육상으로부터 기인하는 오염물질이 감소되지 못하고 있기에 계속 악화되어지는 경향을 보이고 있다.

TOC의 농도 분포는 0.10~0.50%(평균 0.19%) 범위였고 2월 평균농도가 0.24%로 타 계절에 비해 가장 높았으며, 육상부하량이 많은 만 북부 내만수역에서 높고 만 입구로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 이는 COD의 분포 특성과 유사한 형태를 보이며, 가막만의 퇴적물 환경 개선을 위해서는 북서내만역의 조류소통 개선 및 해역환경 개선을 위한 조치가 필요함을 방증해 주고 있다(Fig. 8)[10].

3.2. 미세조류 특성

2005~2006년 가막만 해수에서 검출된 식물플랑크톤 광합성 색소는 chlorophylls 3종과 carotenoids 12종이며, chlorophyll *a*의 분해산물인 chlorophyllide *a* (chlide *a*)와 phaeophytin *a* (phytin *a*)가 검출되었다. chlorophylls는 chlorophyll *a* (chl *a*)를 비롯하여 chlorophyll *b* (chl *b*), chlorophyll *c* (chl c_{1+2})가 검출되었고, carotenoids는 fucoxanthin (fuco), alloxanthin (allo), peridinin (perid), diadinoxanthin (diadino), diatoxanthin (diato), 19'-hexanoyloxyfucoxanthin (hex-fuco), 19'-butanoyloxyfucoxanthin (but-fuco), zeaxanthin (zea), lutein (lut), prasinoxanthin (prasino), violaxanthin (viola) 그리고 beta-carotene (beta-car)이 검출되었다. 검출된 보조색소 중 fucoxanthin이 주요색소였고, 그 외의 색소들은 미량으로 검출되었다.

가막만 퇴적물에서 검출된 식물플랑크톤 광합성 색소는 해수에서 검출된 색소와 비교해서 양적인 차이는 있었으나 검출된 색소의 종류는 유사하였다. chlorophylls는 chl *a*를 비롯하여 chl *b*, chl *c*가 검출되었고, carotenoids는 fuco, allo, perid, diadino, diato, hex-fuco, but-fuco, zea, lut, prasino, viola 그리고 beta-car로 총 12종이 검출되었다. chl *a*의 분해산물로는 chlide *a*와 phytin *a*가 검출되었다. 가막만 퇴적물에서 검출된 chl *a* 농도는 겨울철에는 0.29~5.14 μg/g(평균: 1.43 μg/g)범위를 보였으며, 여름철로 갈수록 다소 증가되고 있다. 퇴적물의 수평분포 특징에서 대부분의 정점에서는 1~2 μg/g의 농도 분포를 보였으나, 남부 외해역의 영향을 받는 정점 10~12에서는 5 μg/g 이상의 높은 농도를 나타냈다.

가막만 퇴적물에서 검출된 보조색소 중 fuco가 주요색소로 검출되었고, 그 외 색소들은 미량 검출되었다. 그리고 chl *a*의 분해산물인 phytin *a*는 만의 가장 안쪽 퇴적물(정점 21, 22, 23, 24)에서 chl *a* 농도보다 높은 값을 나타내었다. 이는 가막만 가장 안쪽 해역에서 이전에 식물플랑크톤 bloom이 발생하였음을 나타내는 것으로 판단된다. 퇴적물의 미세조류의 분포는 phytin *a*에서 나타나듯이 가막만 내측해역에서 비교적 활발하게 나타나고 있으며, chl *a*에 대한 chlide *a*의 상대적인 비는 3% 내외로 생리상태가 양호한 것으로 보여진다.

검출된 색소 종류와 함량을 보면 주로 규조류가 전체 식물플랑크톤 생체량의 대부분을 차지하였다.

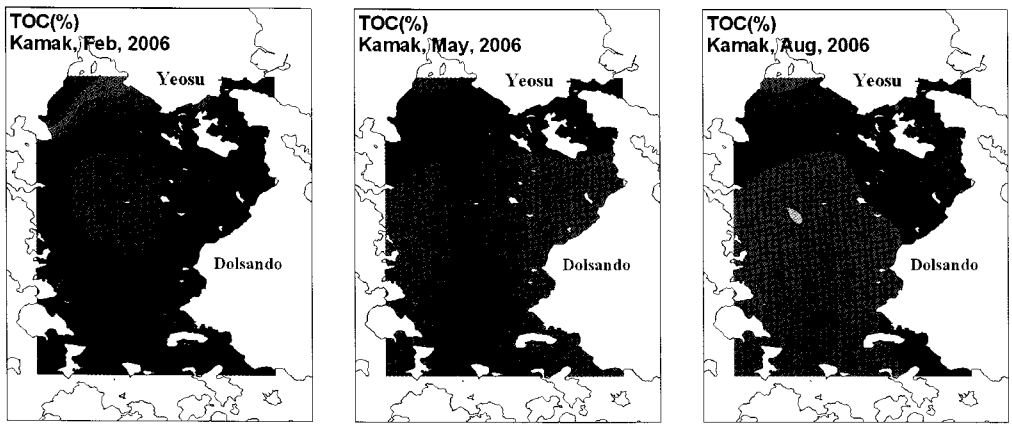

Fig. 8. TOC distribution at sediment in Feb. (left), May (center), Aug. (right), 2006.

표 · 저층 chl *a* 농도는 0.24~8.11 μg/L 범위였고, 계절별로 점진적인 증가를 보였다. 2월의 경우 표층은 만 중부와 북동부 수역에서 가장 높은 농도를 보였고, 5월은 2월과 거의 유사한 분포가 나타났다. 8월에는 표층은 만 남부 입구와 북동부 수역에서, 저층은 남서부 입구 수역에서 다소 높은 농도 분포를 보였다(Fig. 9.). 여러 연구자에 의해 제안된 chl *a*에 의한 영양도 판정기준에 의하면[11] 겨울철에는 빈영양 내지 중영양을 보이며, 봄철 하수처리장 및 돌산대교의 해수소통지역의 영향을 받게 되는 만 동북부 역에서는 중영양상태를 보이기 시작한다. 여름 들어 남쪽 해수소통지역 및 북동부역에서 5 mg/L에 도달하는 부영양상태를 나타내며, 가을철 만 중앙역에서는 부영양상태, 남쪽 만 입구해역에서는 중영양 상태를 보여서 굴 성장 생리의 특성상 여름부터 가을까지 풍부한 먹이생물을 필요로 하는 기간에 적합한 형태를 보이고 있다. 가막만 표층수의 계절별 chl *a* 농도는 전 조사기간을 통하여 0.24~6.98 μg/L 범위로 정점별, 계절별 변화 폭이 매우 컸다. 계절별 평균 농도는 여름철인 8월에 2.31 μg/L로 가장 높은 농도를 보였고, 겨울철인 2월에 1.29 μg/L로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 가막만 내측에서 비교적 높은 농도를 보였고, 만 전체를 통하여 복잡한 농도 분포를 보이고 있었다(Fig. 10.).

수서생태계에서 표층수와 저층수의 공간적 분포 특성은 저층수와 표층수가 전반적으로 유사했으나, 수심이 얕은 가막만의 특성으로 표층의 chl *a*가 분해되기 전에 중층과 저층에 도달하여, 표층수에서보다는 중층, 저층수에서의 chl *a* 농도가 다소 높은 값을 나타내었다. 저층수에서도 가막만 해수에서 검출된 보조색소 중, fuco가 주요색소로 검출되었고, 그 외 색소들은 미량 검출되었다. 검출된 색소 종류와 함량을 보았을 때, fuco, diadino, diato, beta-car를 주요색소로 가지는 diatoms이 전체 식물플랑크톤 생체량의 대부분을 차지하는 주요 종으로 나타났다. 여름철의 경우 성층의 발달로 연직혼합

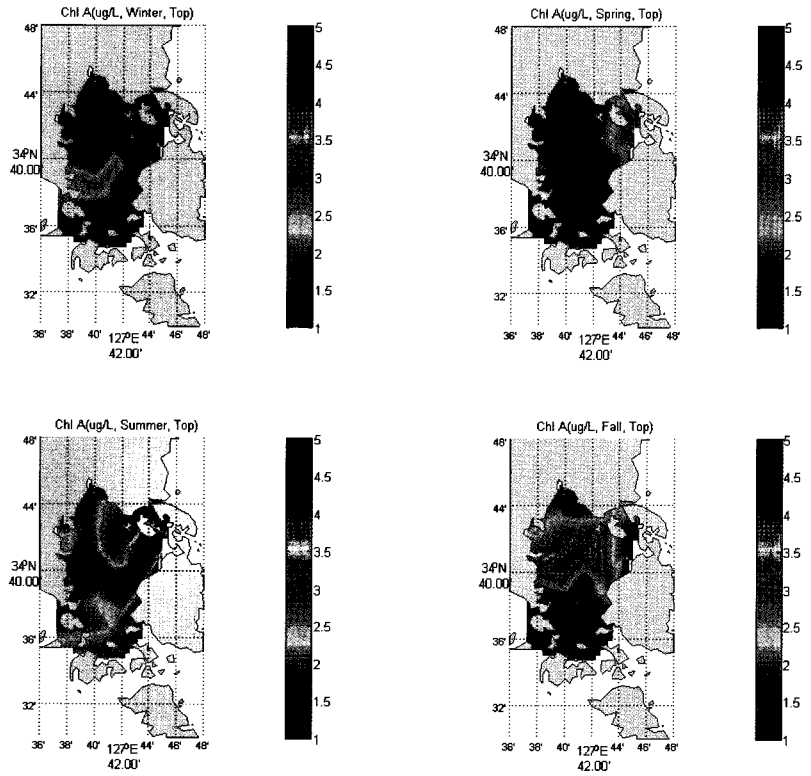

Fig. 9. Seasonal variation of chl *a* at the surface sea waters in Gamak Bay, 2005~2006.

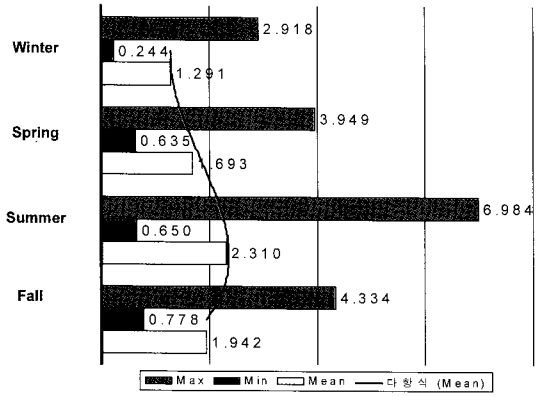

Fig. 10. Seasonal variation of chl *a* at the surface sea waters in Gamak Bay, 2005~2006.

이 원활하지 못해 표층, 저층간의 chl *a* 농도 차이가 뚜렷이 나타났으며, 저층에서의 chl *a* 농도는 대부분의 정점에서 2 μg/L이하의 낮은 농도를 보였고, 표층, 저층간의 chl *a* 농도 분포양상도 상이하였다 (Fig. 11.).

chl *a*의 분해산물인 chlide *a*와 phytin *a*는 가막만 해수에서 전 조사기간을 통하여 검출되었는데, chlide *a*는 식물플랑크톤의 노화로 인해 생성되며, 특히 diatom의 노화과정에 의해 주로 생성된다[12]. 또한 phytin *a*는 다른 동물들의 섭이 과정에 의해 생성되는 물질로, 이들 분해산물의 분석을 통해 식물플랑크톤의 생리적 상태와 chl *a*의 분해 경로를 추적할 수 있다[13].

식물플랑크톤의 분해산물인 phytin *a*의 분포를 여름과 가을철에 대해서 표층과 저층에 대해서 살펴보면, 표층역에서는 큰 차이가 나타나지 않지만, 저층에서는 여름철에 남부해역에서 높게, 가을철에는 만 중앙역에서 높게 나타난다. 이는 굴 양식을 중심으로 볼 때 패각 및 생체량이 증가하는 여름부터 가을철에 굴 양식해역에서 수서생물에 의한 대사활동

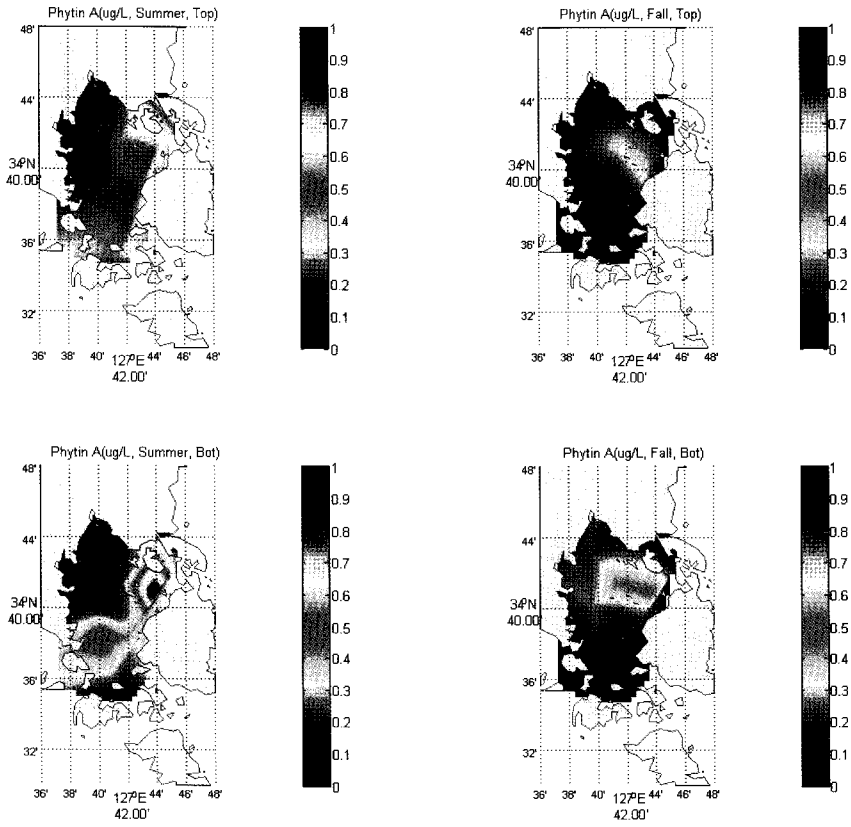

Fig. 11. Seasonal variation of Phytin A at the surface sea waters in Gamak Bay, 2005~2006.

이 다른 해역에 비해 보다 활발하게 이뤄지고 있음을 나타낸다. 수서미세조류의 노화정도를 파악하는데 사용되는 chlide *a*의 농도는 chl *a*에 대한 상대적인 비로 나타내는데 이는 대부분 해역에서 10% 이하의 범위를 보이고 있어, 건강한 식물플랑크톤으로 볼 수 있다[14]. 이와 같은 분포는 가막만 저층에서도 유사한 형태를 보이고 있으며, phytin *a*의 농도가 가막만 동부 내측수역까지 높게 나타나고 있어 현지 어민들에 의해 이뤄지고 있는 굴양식의 현황을 반영하고 있다. 저층상태 역시 대체로 건강한 식물플랑크톤으로 보이며, 전년도 보다 미세조류의 성장에 더 좋은 환경이었던 것으로 여겨진다.

2005년부터 계절별로 관측된 수서 및 저서생태계의 색소에 관한 연구를 통해서 연변동 및 경년변동의 특성을 파악할 필요가 있다. 이는 가막만에서 이뤄지고 있는 양식산업의 동향과도 관련이 깊으며, 양식생물의 먹이가 되는 식물플랑크톤의 변동특성과의 관계를 찾아보는데도 도움이 될 것이다. 궁극적으로 굴 양식의 관점에서 보았을 때 물리, 화학, 생물학적인 변동에 따라서 양식산업의 발달정도를 살펴볼 수 있다. 특히, 양식생물의 먹이 때문에 나타난 특성인지, 대사과정에서의 변동특성을 반영한 것인지에 대한 평가가 필요하다.

3.3. 식물플랑크톤 군집조성 특성

해양 식물플랑크톤은 각 그룹별로 biomarker 색소를 가짐으로써, 마커 색소의 확인만으로 그들의 존재를 쉽게 알 수 있으나, 공통색소를 갖기도 한다[4]. Diatoms는 fucoxanthin과 diadonoxanthin, dinoflagellates는 peridinin, cryptophytes는 alloxanthin, pelagophytes는 19'-butanoyloxyfucoxanthin, prasinophytes는 prasinoxanthin을 마커 색소로 가진다. 또 golden-brown algae에 속하는 prymnesiophytes는 19'-hexanoyloxyfucoxanthin을, chrysophytes는 fucoxanthin과 함께 viloaxanthin을 가진다. green algae의 chlorophytes는 lutein을, blue-green algae의 cyanobacteria는 zeaxanthin을 확인함으로써 알 수 있다[12].

식물플랑크톤에 관한 chl *a*와의 색소별 비의 값을 입력 값으로 처리하여 얻어진 총 색소 농도합에 대한 각 색소별 농도비를 통해서 군집조성에 관한 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 식물플랑크톤 그룹 중 chlorophytes는 chl b, dinoflagellates의 marker 색소인 Peridinin을, diatoms은 Fucoxantin, cyanobacteria는 Zeaxanthin, chrysophytes는 Violaxanthin을 마커 색소로 갖는다. 이를 가막만 해역에 대해서 평균적으로 나타내면 dinoflagellates의 포함 색소비는 Peridinine 10~35 %, chl *a* 45~80%이며 나머지 색소는 미량을 보인다. 이를 계절별로 나타내면 아래 그림과 같고, dinoflagellates, haptophytes S, cyanobacteria, diatoms의 색소비가 계절별로 변동성을 갖고 있다(Fig. 12.).

CHEMTAX에 의해 얻어진 정점별 식물플랑크톤의 종특성은 가막만 수괴의 특성상 세 가지로 구분이 가능하다. 2005년 여름 표층에 대해서 만 내측정점(G24)의 경우에는 diatoms이 76%로 우세하며, dinoflagellates가 14%로 내측의 경우에는 만 중앙역이나 외해역보다 높게 나타나며, prasinophytes의 경우에는 4%를 보이고, 그 밖의 종들은 적게 분포하고

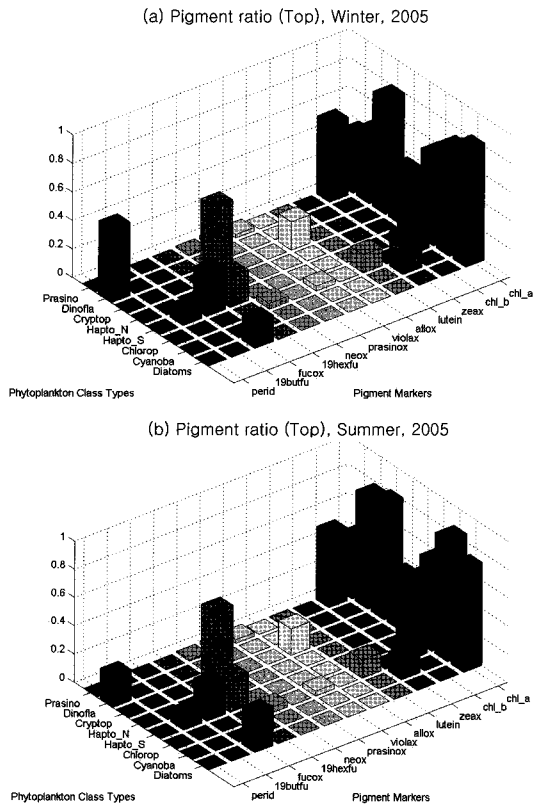

Fig. 12. Comparison pigment ratio between (a)winter and (b) summer in Gamak Bay, 2005.

있다. 반면 만 중앙역(G 17)의 경우에는 diatoms의 비율은 75%로 내만역과 유사하나 prasinophytes, cyanobacteria, cryptophytes, dinoflagellates의 순서로 점유율을 보이고 있다. 반면 남부 외해역(G10)에 해당하는 정점의 경우에는 diatoms이 88%로 만 중앙역이나 내측해역보다 월등히 높으며, cyanobacteria 5%, prasinophytes 3%를 보이고, 나머지 종은 매우 적은 분포를 나타내고 있어 만을 구분짓는 세 개의 특성을 보이며 해당 지역별로 색소분포의 특성이 상이하게 나타나기에 이를 반영하고 있는 것으로 여겨진다(Fig. 13.). 새만금 갯벌 연구결과에서 오 등[15]에 의해 보고된 바와 같이 diatoms이 주요종으로 나타난 색소조성과 유사하며 diatoms의 비율은 chl *a*에 대한 fuco의 비에 기인하고 있다.

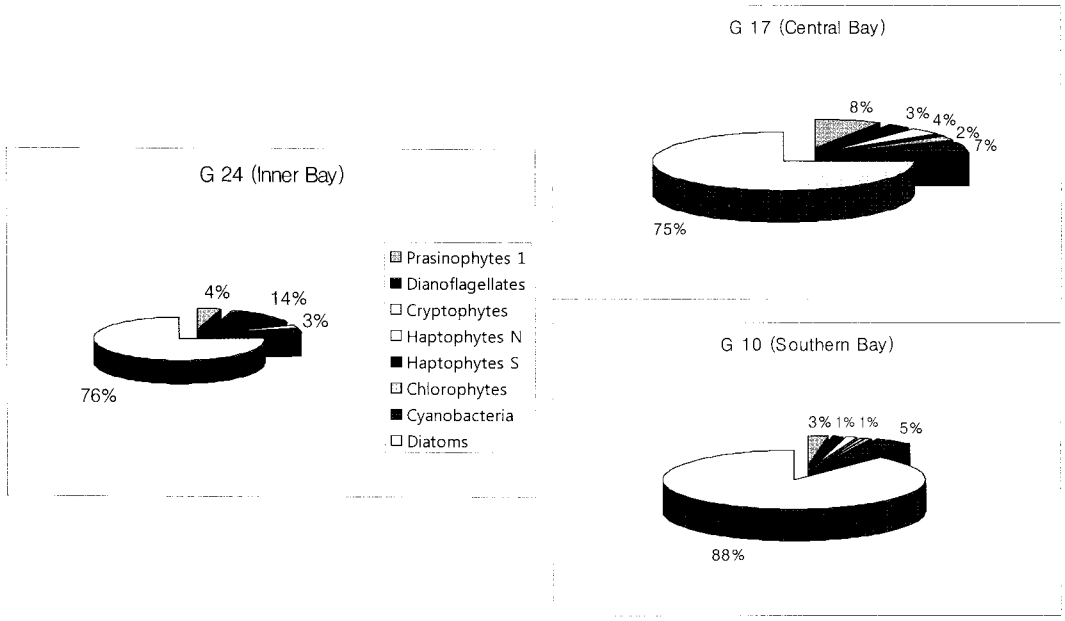

Fig. 13. Comparison results of phytoplankton taxonomy in inner, central, southern Gamak Bay, summer of 2005.

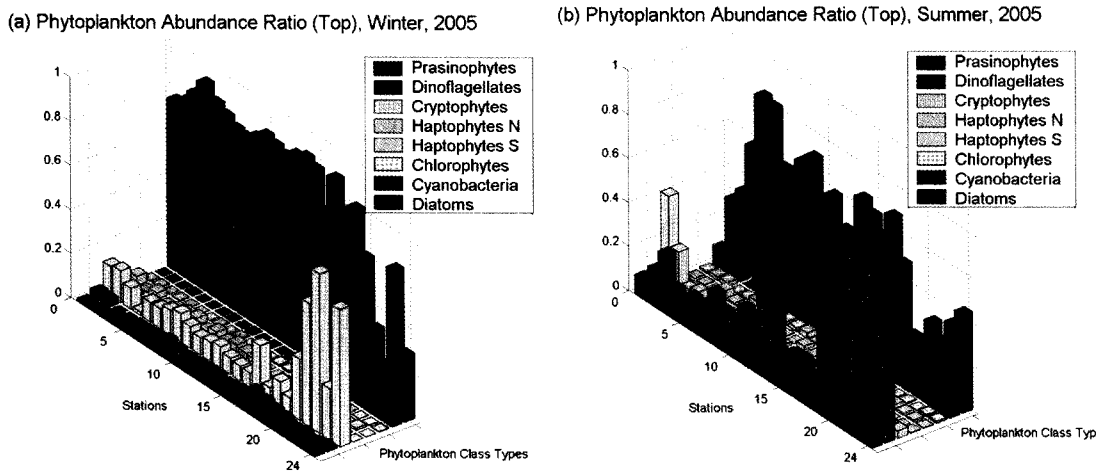

Fig. 14. Comparison phytoplankton abundance ratio between (a) winter and (b) summer in Gamak Bay, 2005.

가막만 표층수 및 저층수에서 전 조사기간을 통하여 perid, fuco가 주요색소로 검출되어 dinoflagellates와 diatoms이 주요 종으로 출현하였다. 그리고 dinoflagellates와 diatoms의 계절별, 정점별 분포특성은 전반적으로 표층수와 유사하였으나, 성층이 발달하는 여름철에는 표층, 저층간의 분포차이가 뚜렷이 나타났다. 8월 표층수에서는 dinoflagellates가 다소 우점하는 경향을 보였으나, 저층수에서는 대부분의 정점에서 diatoms이 우점하는 경향을 보였다. 이는 fuco가 perid에 비해 광산화 등 분해에 잘 견디는 안정된 구조를 가지고 있어 해수 내 체류시간이 더 길기 때문인 것으로 사료되며, 이는 본 연구에 분석된 색소자료는 입자태 유기물에서 기인하고 있기 때문이다. 그 외 보조색소들은 대부분의 정점에서 한계농도 이하로 검출되어, 저층수에서는 cryptomonads, prymnesiophyte, chromophytes, chrysophytes, chlorophytes, cyanobacteria가 몇몇 정점에서만 미량 분포하고 있음을 알 수 있었다. 특히 성층이 발달하는 8월의 경우는 fuco와 perid를 제외한 대부분의 보조색소가 저층수에서는 검출되지 않았다.

가막만 겨울철 표층수에서 diatoms이 대부분 해역에서 우점하고 있으나, 북서내만역(G21~G24)에서는 cryptophytes의 비율이 20~40%정도를 차지하고 있으며, dinoflagellates의 비율은 전 해역에서 5% 안팎을 나타내고 있다. 반면, 여름철 표층수에서는 diatoms의 우점현상이 겨울철에 비해서 다소 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 북서내만역의 경우 dinoflagellates의 비율이 증가했으며, cyanobacteria의 경우 만 중앙역에서 겨울철에 비해서는 증가된 값을 나타내고 있다(Fig. 14.). 정확한 군집조성을 파악하기 위해서 보다 연속적인 관측이 수반되어져야 하겠으며, 박테리아 군집조성 등을 연구하기 위한 생리실험 결과도 보완되어져야 할 것이다.

향후 CHEMTAX를 보완하기 위해 진행되는 동일 시료 확보를 통한 생물학적 분석과 화학적 분석의 동시 수행을 통하여 보완할 필요가 있다[16,17]. 이는 현미경 관찰을 통해 얻을 수 있는 동정기술은 편모조류의 경우 적조발생과의 관계를 규명함에 있어 유해성 편모조류와 무해성 편모조류를 구분하고 있으나, 본 연구의 결과는 이를 구분하고 있지 못하기에 각각의 편모조류의 배양 및 색소특성 분석을 통해서 모델의 결과에 적용하는 노력이 필요하다[18]. 특히, 초미세 플랑크톤을 동정함에 있어 작은 세포크기로 인해서 많은 어려움이 따르기에 현미경 동정시 cyanobacteria 등을 제외하고 있으나 본 연구의 결과에서는 색소를 이용해서 군집조성의 특성을 나타내고 있기에 이런점은 자연 현상의 이해도를 높일 수 있다고 여겨진다.

4. 결 론

본 연구는 현미경 관찰시 요구되는 정확한 동정기술과 상당한 시간에 대한 문제 해결을 위해서 HPLC를 통해 정량, 정성 분석된 색소자료를 1990년대 개발된 CHEMTAX를 이용하여 연구하였다. 또한 CHEMTAX를 활용하여 2005년~2006년 가막만의 군집조성 특성을 살펴봄으로써 기존의 현미경 관찰을 통한 군집조성 연구의 한계를 보완하고자 했다.

검출된 색소 종류와 함량을 보면 주로 규조류가 전체 식물플랑크톤 생체량의 대부분을 차지하였다. 표 · 저층 chl *a* 농도는 0.24~8.11 μg/L 범위였고, 계절별로 점진적인 증가를 보였다. 2월의 경우 표층은 만 중부와 북동부 수역에서 가장 높은 농도를 보였고, 5월은 2월과 거의 유사한 분포를 보였다. 8월에는 표층은 만 남부 입구와 북동부 수역에서, 저층은 남서부 입구 수역에서 다소 높은 농도 분포를 보였다. 여러 연구자에 의해 제안된 chl *a*에 의한 영양도 판정기준에 의하면 겨울철에는 빈영양내지 중영양을 보이며, 봄철 하수처리장 및 돌산대교의 해수소통지역의 영향을 받게 되는 만 동북부역에서는 중영양상태를 보이기 시작한다. 여름들어 남쪽 해수소통지역 및 북동부역에서 5 mg/L에 도달하는 부영양상태를 나타내며, 가을철 만 중앙역에서는 부영양상태, 남쪽 만 입구해역에서는 중영양 상태를 보여서 굴 성장 생리의 특성상 여름부터 가을까지 풍부한 먹이생물을 필요로 하는 기간에 적합한 형태를 보이고 있다. 가막만 표층수의 계절별 chl *a* 농도는 전 조사기간을 통하여 0.24~6.98 μg/L 범위로 정점별, 계절별 변화 폭이 매우 컸다. 계절별 평균 농도는 여름철인 8월에 2.31 μg/L로 가장 높은 농도를 보였고, 겨울철인 2월에 1.29 μg/L로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 가막만 내측에서 비교적 높은 농도

를 보였고, 만 전체를 통하여 복잡한 농도 분포를 보이고 있었다.

가막만 겨울철 표층수에서 diatoms이 대부분 해역에서 우점하고 있으나, 북서내만역에서는 cryptophytes의 비율이 20~40%정도를 차지하고 있으며, dinoflagellates의 비율은 전 해역에서 5% 안팎을 나타내고 있다. 반면, 여름철 표층수에서는 diatoms의 우점현상이 겨울철에 비해서 다소 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 북서내만역의 경우 dinoflagellates의 비율이 증가했으며, cyanobacteria의 경우 만 중앙역에서 겨울철에 비해서는 증가된 값을 나타내고 있다.

감사의 글

이 연구는 농림수산식품부 국립수산과학원의 R&D 경상과제인 "연안어장 환경용량 산정연구"의 일환으로 수행되었습니다. 연구 자료를 확보하고 분석하는데 도움을 준 수과원 환경연구팀 연구진에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) 박성진, 2003, 가막만의 해양환경과 굴양식장에 미치는 바람효과, 석사학위논문, 해양학과, 여수대학교, 여수.
2) Guarini J. M., Blanchard G. F., Bacher C., Gros P., Riera P., Richard P., Gouleau D., Galois R., Prou J., Sauriau P. G., 1998, Dynamics of spatial patterns of microphytobenthic biomass: Inferences from a geostatistical analysis of two comprehensive surveys in Marennes-Oleron Bay(France), Marine Ecology Progress Series, 166, 131-141.
3) Montagna P. A., Blanchard G. F., Dinet A., 1995, Effect of production and biomass of intertidal microphytobenthos on meiofaunal grazing rates, Journal of Experimental Marine Biological Ecology, 185, 149-165.
4) Anderson R. A., Bidigare R. R., Keller M. D., Latasa M., 1996, A comparison of HPLC pigment signatures and electron microscopic observations for oligotrophic waters of the North Atlantic and Pacific Oceans, Deep Sea Research, 43, 517-537.
5) Mackey M. D., Mackey D. J., Higgins H. W., Wright S. W., 1996, CHEMTAX-A program for estimating class abundances from chemical markers: Application to HPLC measurements of phytoplankton, Marine Ecology Progress Series, 144, 265-283.
6) 국립수산과학원, 2005, 해양환경공정시험방법, 55-65.
7) http://www.mathworks.com
8) Lewitus A. J., White D. L., Tymowski R. G., Geesey M. E., Hymel S. N., Noble P. A., 2005, Adapting the CHEMTAX method for assessing phytoplankton taxonomic composition in Southeastern U.S. estuaries, Estuaries, 28(1), 160-172.
9) 이대인, 조현서, 2002, 가막만 해역의 오염부하 특성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 11(9), 945-954.
10) 김귀영, 2002, 가막만의 이화학적 환경특성과 퇴적물에서의 물질 거동 연구, 박사학위논문, 환경공학과, 영남대학교, 대구.
11) Forsberg G., Ryding S. O., 1980, Eutrophication parameters and tropic state indices in 30 waste receiving Swedish Lakes, Archiv Hydrobiol, 89, 189-207.
12) Jeffrey S. W., Mantoura R. F., Wright S. W., 1997, Phytoplankton pigments in oceanography: Guideline to modern methods, UNESCO Publishing, 74-75.
13) 이용우, 2001, HPLC를 이용한 곰소만 퇴적물 중의 저서미세조류의 색소 연구, 석사학위논문, 해양학과, 부경대학교, 부산.
14) Bidigare R. R., Frank T. T., Zastrow C., Brooks J. M., 1986, The distribution of algal chlorophylls and their degradation products in the southern ocean, Deep Sea Research, 33, 923-937.
15) 오승진, 문창호, 박미옥, 2004, 한국 서해 새만금 갯벌에서 저서미세조류의 생체량과 군집조성에 대한 HPLC 분석, 한국수산학회지, 37(3), 215- 230.
16) Wright S. W., Jeffrey S. W., 2006, Pigment markers for phytoplankton production In: Marine Organic Matter: Biomarkers, isotopes and DNA, Springer-Verlag, Berlin, ISBN-10-3-540-28401-X, 71-104.
17) Zapata M., Jeffrey S. W., Wright S. W., Rodriguez F., Clementson L., Garrido J. L., 2004, Photosynthetic pigments in 37 species(65 strains) of Haptophyta: Implications for phylogeny and oceanography, Marine Ecological Progress Series, 270, 83-102.
18) Park M. O., 2006, Composition and distribution of phytoplankton with size fraction results at Southwestern East/Japan Sea, Ocean Science Journal, 41(4), 301-313.