

## 여름철 남해도 연안 식물플랑크톤 군집 구조의 단기 변화

임월애\* · 강창근 · 김숙양 · 이삼근 · 김학균 · 정익교<sup>1</sup>

(국립수산과학원 해양환경부 · <sup>1</sup>부산대학교 해양과학과)

### Short-term Changes of Community Structure of Phytoplankton in Summer Around Namhae Island of Korea

Wol-Ae Lim\*, Chang-Keun Kang, Sook-Yang Kim, Sam-Geun Lee,  
Hak-Gyoon Kim and Ik Kyo Chung<sup>1</sup>

Oceanography and Marine Environment Department, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-902 and

<sup>1</sup>Department of Marine Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

The short-term dynamics of the summer phytoplankton community structure were investigated in coastal waters around Namhae Island, the Southern Sea of Korea. The study was based on a comprehensive survey constituting 39 collections from 13 stations on July 18-22, August 1-2, 14-16 and 27-30, respectively. The community structure was analysed using cluster analysis and important environmental correlates of the assemblage structure were identified with canonical correspondence analysis (CCA). Water temperature, salinity, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, chlorophyll *a* and transparency were measured as physico-chemical environmental factors which may be associated with the phytoplankton community structure. Variations of salinity and concentrations of NO<sub>3</sub> and chlorophyll *a* were not significant. In addition to warmer water temperature, concentrations of NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> and PO<sub>4</sub> decreased at the beginning of August. And transparency was deeper and water column became very unstable after the middle of August. A wide taxonomic diversity was encountered during the survey, including a total of 121 taxa which was composed of 72 diatoms, 48 dinoflagellates and 1 euglenoid species. Cluster analysis showed that the phytoplankton community could be divided into 4 distinct groups, indicating rapid changes of the community in the short course of this survey. These phytoplankton groups also showed distinctive dispersion patterns in 2-dimensional canonical space, indicating distinct groupings for stations at each survey. Dominant taxa of diatoms (*Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus danicus*, *Leptocylindrus mediterraneus*, *Skeletonema costatum*, and *Pseudo-nitzschia pungens*) clustered in a region of CCA space corresponding to stations surveyed at the middle of July. Dominant taxa of dinoflagellates were tightly associated with stations surveyed at the middle (*Karenia brevis*) and end (*Cochlodinium polykrikoides* and *Polykrikos schwartzii*) of August. The CCA also showed that the phytoplankton community compositions were highly associated with water temperature, transparency, NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> and PO<sub>4</sub>, suggesting that gradients in physical and nutrient conditions affect short-term changes in phytoplankton composition.

**Key Words:** diatoms, dinoflagellates, Korean coastal waters, multivariate statistics, phytoplankton community, short-term change

#### 서 론

남해도 연안 해역은 지형학적으로 외양수의 영향을 직접 받는 해역이다. 한반도 남해연안에서는 대마난류수와 황해 난류수, 중국 대륙연안수, 한국 남해연안수와 같은 특성이

서로 다른 다양한 수괴들이 접하는 해역으로, 각 수괴 사이에는 해양전선(ocean front)이 형성된다(Yang and Kim 1990; 박 등 1998; 양 등 1998). 따라서, 남해연안의 해수 특성은 특정 해류의 세력확대, 해저지형, 육수유입과 기상현상 등 여러 가지 요인에 의하여 계절 변화가 대단히 크다(공 1971; 강 1974; Lee *et al.* 1984; 나 등 1990; 강과 전 1999). 이와 같은 전선의 형성 위치는 이 해역의 분포 생물상을 변화시키는 주 요인으로 알려져 있다(추와 김 1998; 추 2002).

\*Corresponding author (limwa@nfrdi.re.kr)

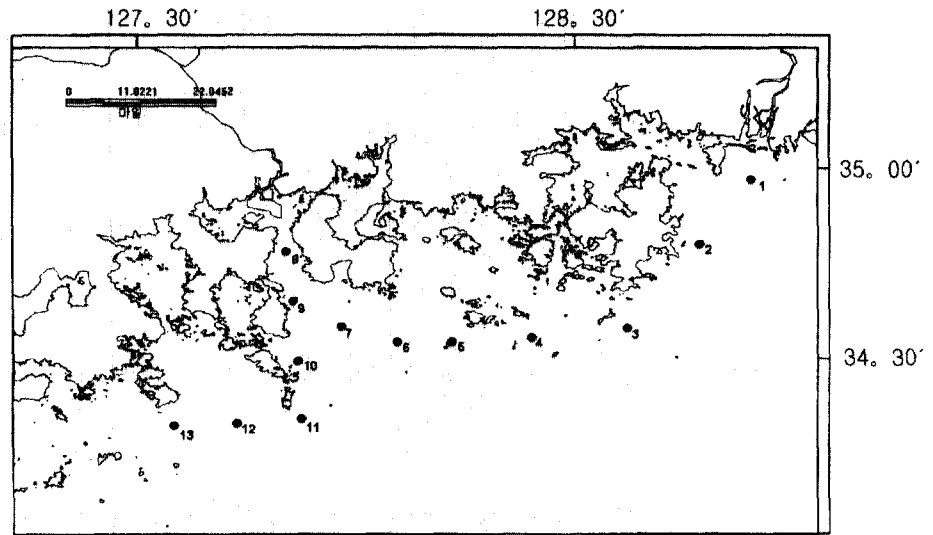


Fig. 1. Map showing the study area.

특히, 남해 표층수는 여름과 가을에 양자강에서 유입되는 저염수의 영향으로 저염과 고온의 특성을 갖는다(Kang and Jin 1984; 조와 최 1988; 김 등 1998a; 김 2000). 박과 이 (1990)는 여수 남단해역에서 식물플랑크톤의 현존량이 2월과 4월에 높은 반면 상대적으로 8월에는 매우 낮다는 것을 발견하였는데, 이와 같은 현상은 다른 때 보다 조사가 실시된 해의 대마난류수가 세력이 커져서 연안 가까이 강하게 접근한 결과로 나타난 것으로 추론하였다. 또한, 정 등(1999)은 1998년 여름철 남해도 부근해역에서 대마난류의 지표종으로 알려진 *Sagitta enflata*가 급격히 증가하는 현상을 관찰하였고 이는 대마난류수가 연안 가까이 유입되어 나타난 것으로 보고하였다. 추와 김(1998)은 대마난류의 세력이 커지는 여름철에는 연안 가까이에서 형성된 전선역에서 멸치의 유생이나 알이 전선역에 모이거나, 연안으로 수송된다고 하였다. 따라서, 외양수가 연안으로 세력을 확장하면 이에 의한 연안 해역의 물리환경과 생물군의 변화가 일어날 수 있다.

남해도 연안 해역은 섬진강을 통하여 유입되는 담수와 함께 광양만의 산업폐수 및 가정하수가 포함된 부영양화수가 여수해만을 통해서 외해로 유출되는 통로역할을 하는 해역으로 적조 발생이 빈번하게 일어나고 있다(심 등 1984; 김 등 1998b; 이 등 1999). 또한, 이 해역은 육상 오염원에 의한 다량의 인의 공급이 유지되어 질소계 영양염이 식물플랑크톤에 대한 제한을 나타내는 것으로 알려져 있다(Moon 1990; 이 등 2001a). 1995년 이후 매년 이 해역에서 시작되는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생 또한 연구 수역인 남해도 연안의 해양환경 변화에서 기인한 것으로 보이며, 이와 같은 *Cochlodinium*에 의한 적조현상은 매년 여름철(주로 8월말)에 빈번하게 출현하는 주기성을 가지고 있다(김 등 2001; 이 등 2001b; Lee et al. 2002). 따라서 여름철에 연구 수역에서의 식물플랑크톤 군집구조의 단기 변동과 그에 미

치는 요인에 대한 자료는 이 해역의 적조발생 기작을 이해할 수 있는 중요한 정보가 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 남해도 주변해역에서 빈번히 발생하는 적조 현상을 해석하기 위하여 이 해역의 여름철 식물플랑크톤의 군집구조와 분포 변동 양상을 물리적 특성과 영양환경의 변동과 함께 조사하였다. 특히 본 연구는 1) "남해도 연안 해역에서의 해양환경 요인의 단기 변동이 식물플랑크톤 조성의 변화를 초래하는가?"와 2) "이들 환경요인들과 식물플랑크톤 군집조성 사이에 어떤 뚜렷한 관계가 있는가?"를 밝히려고 시도하였다. 이를 위해 물리환경 요인으로 수온, 염분과 수주의 투명도를 조사하였고, 영양환경의 변동을 이해하기 위하여  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ 과  $\text{PO}_4$  등의 영양염 분포와 식물플랑크톤 현존량(chlorophyll *a* 함량과 개체수)의 변동을 함께 조사하였다. 조사 결과 나타난 요인들의 관련성을 통계적 방법으로 해석하였다.

## 재료 및 방법

### 현장조사 및 시료분석

조사 정점은 통영 외해역인 5개 정점(St. 3-7), 여수해만 해역인 3개 정점(St. 8-10)과 나로도 해역인 3개 정점(St. 11-13)과 대조구로서 낙동강의 영향을 받는 거제 동편해역 2개 정점(St. 1-2)을 조사하였다(Fig. 1). 7월 18-22일, 8월 1-2일, 8월 14-16일과 8월 27-30일 4차례에 걸쳐 현장 조사를 수행하였다.

각 조사 정점에서의 수온과 염분의 수직분포는 CTD meter(SeaBird, SBE-25)를 이용하여 측정하였으며, 표층 식물플랑크톤 종조성과 정량 분석은 해수 1/를 현장 채수하여 산성 Lugol 용액으로 고정된 후, 실험실로 옮겨 농축하여 현미경으로 조사하였다. 영양염 분석을 위한 해수 시료는

**Table 1.** Temporal variations of surface temperature, salinity, nutrients and chlorophyll *a*, and transparency during the survey periods. Data represent mean  $\pm$  SD. The same superscript letter following means indicates no significant difference among mean values of environmental variable at each column (Tukey's multiple comparison,  $P < 0.05$ )

Survey (n)	Temperature (°C)	Salinity (‰)	NO <sub>2</sub> (μM)	NO <sub>3</sub> (μM)	NH <sub>4</sub> (μM)	PO <sub>4</sub> (μM)	Chl. <i>a</i> (μg/l)	Transparency (m)
18-22 July (12)	23.18 <sup>a</sup> $\pm$ 0.66	30.11 <sup>ab</sup> $\pm$ 2.0	0.96 <sup>b</sup> $\pm$ 0.22	2.61 <sup>a</sup> $\pm$ 4.42	2.07 <sup>b</sup> $\pm$ 0.58	1.46 <sup>b</sup> $\pm$ 0.83	0.68 <sup>a</sup> $\pm$ 1.22	6.50 <sup>a</sup> $\pm$ 3.91
1-2 August (6)	25.69 <sup>b</sup> $\pm$ 0.70	32.10 <sup>b</sup> $\pm$ 0.40	0.17 <sup>a</sup> $\pm$ 0.06	1.90 <sup>a</sup> $\pm$ 1.92	0.79 <sup>a</sup> $\pm$ 0.63	0.28 <sup>a</sup> $\pm$ 0.38	0.09 <sup>a</sup> $\pm$ 0.08	7.57 <sup>a</sup> $\pm$ 2.99
14-16 August (13)	25.69 <sup>b</sup> $\pm$ 0.73	30.60 <sup>ab</sup> $\pm$ 0.59	0.43 <sup>a</sup> $\pm$ 0.51	4.33 <sup>a</sup> $\pm$ 2.27	1.07 <sup>a</sup> $\pm$ 0.79	0.37 <sup>a</sup> $\pm$ 0.52	0.52 <sup>a</sup> $\pm$ 1.56	12.46 <sup>b</sup> $\pm$ 2.50
27-30 August(8)	26.26 <sup>b</sup> $\pm$ 0.36	27.65 <sup>a</sup> $\pm$ 4.95	0.23 <sup>a</sup> $\pm$ 0.17	1.38 <sup>a</sup> $\pm$ 0.23	0.87 <sup>a</sup> $\pm$ 0.58	0.41 <sup>a</sup> $\pm$ 0.47	0.61 <sup>a</sup> $\pm$ 0.69	5.94 <sup>a</sup> $\pm$ 2.04

10 l van Dorn형 채수기를 이용하여 채수하고, 이를 450°C에서 태운 GF/F필터(Whatman)로 여과한 후 분석 전까지 -70°C에서 냉동 보관하였다. 용존 무기영양염류의 측정에는 Parsons *et al.* (1984)에 의해 기술된 분광광도법을 이용하였다. Chlorophyll *a* (Chl. *a*) 농도는 해수 500 ml를 여과 후 1% 탄산마그네슘 용액으로 처리하고 냉동 보관하여 실험실로 옮긴 후, 여과지를 90% acetone에 넣어 암냉소에 보관하여 24시간 염록소를 추출하고 이를 형광측정기(Turner Designs 10-Au Fluorometer)로 분석하였다(Parsons *et al.* 1984). 투명도(transparency)는 직경 30 cm의 투명도판(secchi disk)을 이용하여 선상에서 육안으로 측정하였다.

#### 자료처리

조사시기에 따른 환경요인의 변동을 조사하기 위하여 일요인 분산분석(one-way ANOVA)법으로 각 조사시기의 환경 요인들의 평균값 사이의 차이를 검정하였다. 분석에 앞서 Sapiro-Wilk 검정으로 자료의 정규성(normality)과 함께 Levene의 검정법에 따라 분산의 동질성(Homogeneity of variances) 검정을 실시하여 heteroscedasticity를 검토한 후, 등분산이 가정될 때 분산분석에서 유의한 차이가 인정되는 결론에 도달하는 환경요인에 대해서는 Tukey의 사후분석(Post Hoc Multiple comparisons)을 수행하여 조사시기에 따른 차이를 검정하였다.

식물플랑크톤 출현빈도에 대한 자료는 다변량 분석법인 분류법(classification)과 배열법(ordination)을 이용하여 분석하였다. 본 연구에서는 총 출현개체수에 순위를 정한 후 총 개체수 중 1% 이상 출현한 9종을 우점종으로 하여 자료를 처리하였으며, 이들 9종의 출현 개체수가 전체의 86.1%를 차지하였다. 따라서 4회의 현장 조사에 대한 원래의 자료행렬에서 1% 미만 출현한 희귀종은 제외하여, 분석에 이용된 자료행렬은 9 species  $\times$  39 stations(cases)로 요약 변형되었다. 이 때, 각 대상의 개체수 자료는 조사시기별, 종간의 심한 개체군 밀도차이에 의한 자료의 편중을 피하고 대상 자료의 분포를 정규화하기 위하여 대수변환( $\log_{10}(x + 1)$ )한 자료를 사용하였다. 식물플랑크톤 군집의 정점간 유사도

(Q-mode)를 평가하고 군집 경계(R-mode)를 정하기 위하여 집괴분석(cluster analysis)을 실시하였다. 이 과정에서 출현종간의 유사성은 조사 기간동안 채집된 9개 우점 출현종에 대해 변형된 자료행렬을 이용하여 Pearson의 상관관계 행렬을 구하고, 이 지수값들을 비가중 산술평균(UPGMA)에 의하여 수상도(dendrogram)를 작성하여 군집화하는 계보적 집괴분석(hierarchical cluster analysis)을 수행하였다. 군집화 결과를 도식적으로 표현한 수상도에서는 거리지수 값들을 0에서 25 사이의 숫자로 다시 계산하여 나타내었다.

식물플랑크톤 군집과 환경요인과의 관계는 배열법인 canonical correspondence analysis(CCA)를 이용하여 분석하였다(ter Braak 1986; ter Braak and Verdouschot 1995). 이 분석법은 각 출현종들 사이의 유사성거리를 계산하여 각 개체간의 상대적 거리를 위치화 시켜 배열한 공간에서 각 객체의 배열과 측정된 환경 요인(variables) 사이에 가장 높은 상관관계를 갖는 모형을 겹쳐서 최종적으로 한 도면(diagram) 상에 정점과 종을 동시에 배열하고, 군집자료와 환경요인의 관계를 분석하는 분석법이다. 이 과정에서는 각각의 축(axis)에 대해 가중평균화(weighted averages) 방법으로 새롭게 생성된 종의 점수(species scores)와 환경요인들 사이에 회귀분석을 수행하고, 환경요인과 CCA 좌표축들 사이의 상관관계로부터 환경요인들의 중요성을 평가하였다. 여기서 이용된 환경요인은 수온, 염분, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, Chl. *a* 및 투명도에 대한 현장 조사자료를 이용하였다. 본 연구에서 분산분석과 집괴분석은 SPSS software (SPSS Inc. 1999)를 이용하였고, CCA 분석은 Windows용 Canoco version 4 software(ter Braak and Smilauer 1998)를 이용하였다.

#### 결 과

##### 환경요인

조사기간 동안 표층 수온은 7월 중순 평균 23.18( $\pm$ 0.66)°C에서 8월 초에 평균 25.69( $\pm$ 0.70)°C으로 높아졌고, 8월말

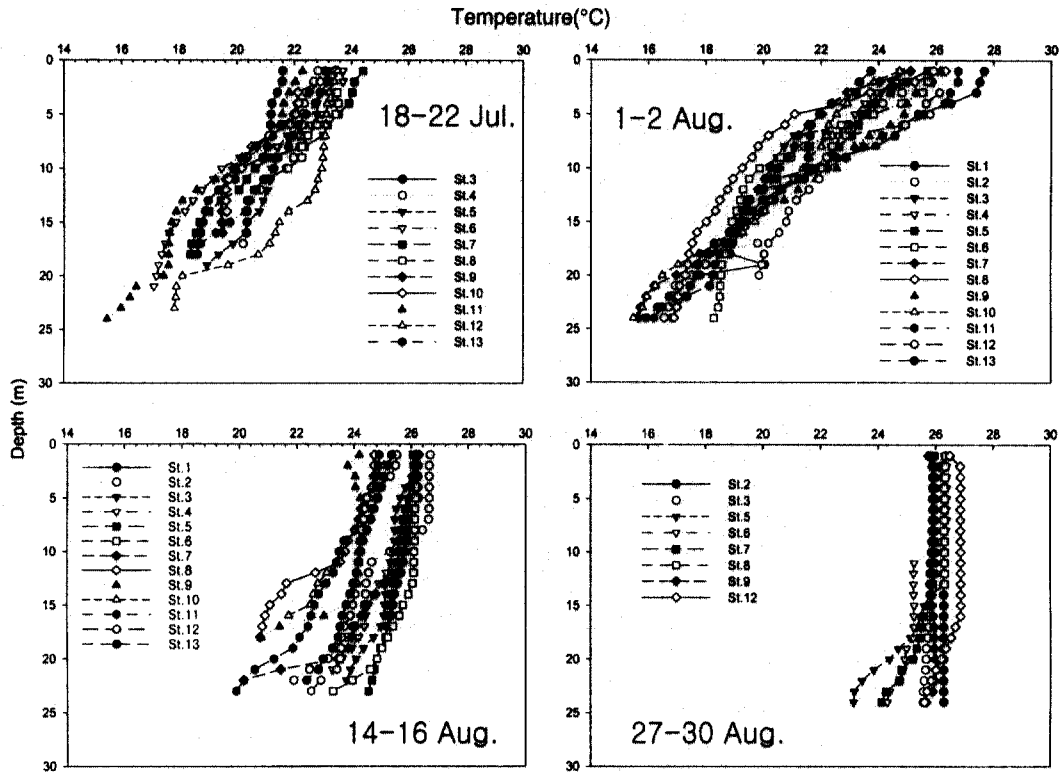


Fig. 2. Vertical distribution of water temperature on July 18-22, August 1-2, August 14-16 and August 27-30, 2001.

에 평균 26.26(±0.36)°C로 가장 높게 나타났다(Table 1). 이 기간 중 표층수의 염분은 8월 초순에 평균 32.10(±0.40) psu로 가장 높고, 8월말에 가장 낮은 평균 27.65(±4.95) psu를 기록하였다. 아질산염, 암모니움과 인산염의 평균 농도는 7월 중순에 각각 0.96(±0.22) μM, 2.07(±0.58) μM과 1.46(±0.83) μM였으며, 8월 초 이후 급격히 감소하였다. 한편, 질산질소의 평균 농도 값은 조사기간 동안 시간에 따른 뚜렷한 변화를 나타내지 않았다. Chl. a 평균농도도 조사기간 동안 뚜렷한 변화를 나타내지 않았다. 투명도는 8월 중순에 평균 12.46(±2.50)m로 가장 깊었고, 그 외의 조사시기에는 8m보다 얇게 나타났다(Table 1).

조사기간 동안 수온의 연직분포도를 Fig. 2에 나타내었다. 7월말에서 8월초 사이의 기간 중에 표층부근에서 수온약층이 뚜렷이 형성되어 표층 혼합층의 수심이 대단히 얕았던 반면, 8월 중순 이후 대부분의 정점에서 수온약층이 사라지고 일부 정점에서 극히 깊은 수심에서만 수온약층이 일부 잔존하고 있는 경향을 나타내었다.

식물플랑크톤 조성

조사 기간 동안에 표층수 중의 식물플랑크톤은 총 121종이 동정되었으며, 그 중 규조류(diatom)가 72종, 와편모조류(dinoflagellates)가 48종, 유글레나류(euglenoid)가 1종으로 구성되었다. 동정된 식물플랑크톤의 순위-빈도를 Fig.

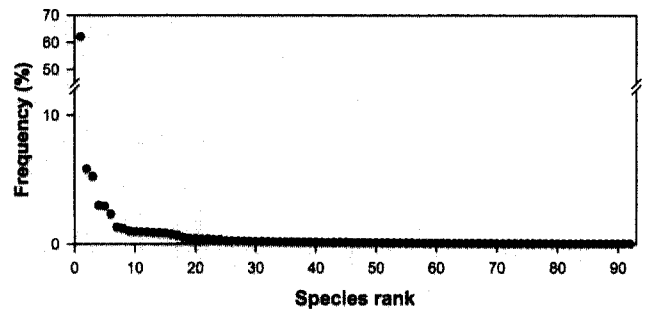


Fig. 3. Species rank-frequency distribution diagram of phytoplankton. Frequency represents % relative abundance of each species of a total of numerical abundance collected. The first high ranked 9 species is *Skeletonema costatum*, *Cochlodinium polykrkoides*, *Leptocylindrus danicus*, *Chaetoceros curvisetus*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Chaetoceros* spp., *Karenia brevis*, *Leptocylindrus mediterraneus*, *Polykrikos schwartzii* and they accounted for 86.1% of total cell counts.

3에 나타내었다. 우점종은 *Skeletonema costatum*(총 개체수에 대한 상대빈도, 62.1%), *Cochlodinium polykrkoides*(5.9%), *Leptocylindrus danicus*(5.3%), *Chaetoceros curvisetus*(3.0%), *Pseudo-nitzschia pungens*(3.0%), *Chaetoceros* spp.(2.4%), *Karenia brevis*(=*Gymnodinium brevis*)(1.3%), *Leptocylindrus mediterraneus*(1.2%), *Polykrikos schwartzii*(1.0%) 순으로 나타났으며, 전체 출현 개체수 1% 이상의

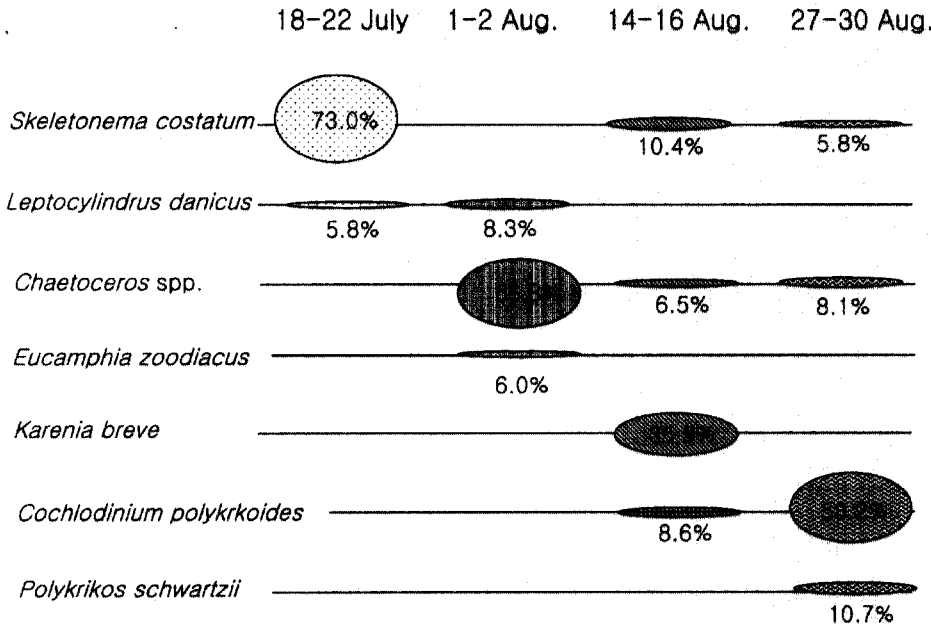


Fig. 4. Dominant species of phytoplankton (> 5% of numerical abundance in a given sample) in each survey.

출현빈도를 점유한 이들 상위 9종이 총 출현개체수의 86.1%를 차지하였다.

각 조사기간 동안 식물플랑크톤 군집의 우점종의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 7월 중순에는 *S. costatum*(전 조사점점의 총 출현 개체수의 73.0%), *L. danicus*(5.8%)가 우점 출현하였으며, 8월 초순에는 *Ch. spp.*(56.3%), *L. danicus*(8.3%), *Eucampia zodiacus*(6.0%), 8월 중순에는 *K. brevis*(35.9%), *S. costatum*(10.4%), *C. polykrikoides*(8.6%)와 *Ch. spp.*(6.5%), 그리고 8월 하순에는 *C. polykrikoides*(58.2%), *P. schwartzii*(10.7%), *Ch. spp.*(8.1%), *S. costatum*(5.8%)가 우점종으로 나타나, 대체로 약 10일 간격의 비교적 짧은 조사간격에도 불구하고 식물플랑크톤 군집의 우점종 천이가 뚜렷하였다.

다변량 분석

9종의 주요 우점 식물플랑크톤의 조사시기에 따른 정점간(Q-mode) 출현빈도에 기초한 Pearson 상관계수 행렬에서 수행한 집괴분석으로 얻은 수상도(dendrogram)는 조사해역의 식물플랑크톤 군집이 조사시기에 따라 크게 두 개의 군집(1과 2)으로 대별되었다(Fig. 5). 이들 두 주요 군집은 다시 2개의 subgroup(1a와 1b, 2a와 2b)으로 대별되어 나타났다. Subgroup 1a는 8월말(8월 27-30일)의 조사점점을 포함하였고, 8월 중순(8월 14-16일)의 일부 정점이 여기에 속하였다. 1b군집은 8월 중순의 대부분 정점군들로 구성되었다. 7월 중순(7월 18-22일)과 8월초(8월 1-2일)의 정점군들은 group 2에 포함되었고, 7월 중순의 일부 정점들이 subgroup 2a에 속하여 이 시기들의 대부분 정점들이 속한 subgroup 2b와 구분되었다. 이와 같은 군집구조의 변동은 우점

종의 시간 경과에 따른 천이와 잘 일치하였다.

식물플랑크톤 군집구조와 분포에 영향을 미치는 주요 환경요인을 확인하기 위하여 CCA 분석을 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 CCA model에서 CCA 축 1에서 축 4까지의 고유값(eigenvalues)은 0.330( $\lambda_1$ )에서 0.045( $\lambda_4$ )의 분포를 나타내었다. 첫 번째 두 개의 축 1과 축 2의 값이 각각 0.330( $\lambda_1$ )과 0.174( $\lambda_2$ )로 상대적으로 높은 반면, 축 3과 축 4는 0.1 이하( $\lambda_3$ 과  $\lambda_4$ )로 상대적으로 아주 낮은 고유값을 가졌다(Table 2). Canonical correlation에 이용된 자료의 총 분산에 대한 고유값(canonical eigenvalues, 0.694)은 전체 자료의 총 분산에 대한 고유값(unconstrained eigenvalues, 1.586)의 43.8%를 나타내었다. 주요 4개 CCA 축의 고유값들은 이들 4개축으로 설명될 수 있는 종 자료의 총 분산에 대한 누적 공통분산의 비율이 39.8%이었고, 그 중 축 1( $\lambda_1 = 0.330$ )과 축 2( $\lambda_2 = 0.174$ )가 각각 전체 변수의 총 변동의 20.8%와 11.0%를 차지하여 모든 플랑크톤 분산의 31.8%가 이들 두 축으로 설명될 수 있다. 한편, 종-환경 관계(species-environmental relation) 자료 분산의 91.0%를 4개 축으로 설명할 수 있는 것으로 나타났지만, 72.7%에 이르는 대부분의 변동이 축 1과 축 2에 의해 설명될 수 있어 축 3과 축 4는 설명에서 제외하였다.

CCA 축 1과 축 2에 각 자료를 배열한 결과, 각 정점의 배열은 집괴분석의 결과와 비교적 유사한 양상을 나타내었고(Fig. 6). 물리 요인들과 영양염 농도의 구배가 CCA에서 식물플랑크톤 군집과 높은 상관성을 갖는다는 것이 나타났다(Table 2와 Fig. 6). 시간의 경과에 따른 변동 양상을 살펴보면, 7월 중순(7월 18-22일)의 자료들은 좌표 평면상의 오른쪽 상단부에 배열되어 NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>와 PO<sub>4</sub>와 같은 영양염 성

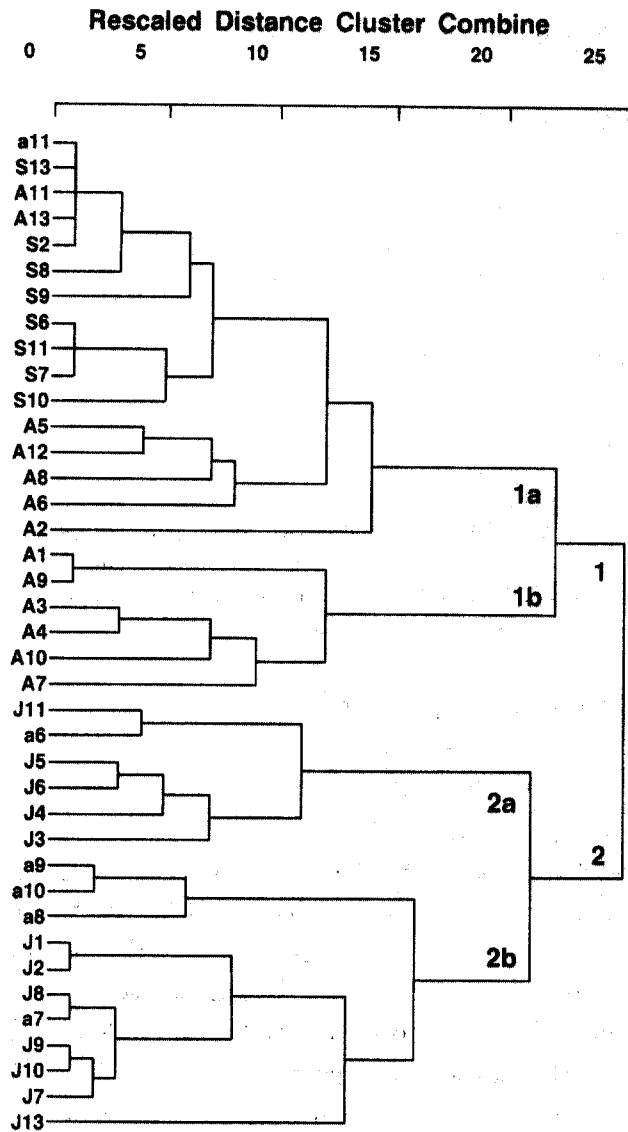


Fig. 5. Dendrogram showing the results of cluster analysis grouping the sampling stations (1a, 1b, 2a and 2b) (Q-mode). The numbers represent the sampling stations; J, July 18-22; a, August 1-2; A, August 14-16; S, August 27-30.

분들과 밀접한 관련을 갖는다는 것으로 나타났다. 한편, 8월 초(8월 1-2일)의 정점군들은 집괴분석에서의 분포와 유사하게 그 분포에서 뚜렷한 특징을 보이지 않았다. 반면, 8월 중순(8월 14-16일)의 정점들은 일부 정점을 제외한 대부분이 좌표의 왼쪽 상부에 비교적 조밀하게 배열되었고, 이는 투명도와 높은 상관성을 보여 주었다. 8월말(8월 27-30일)의 정점들은 8월 중순의 정점들과 분리되어 좌표의 왼쪽 하단부에 밀집하여 나타났고 이들은 수온과 높은 상관성을 보였다.

CCA 도표에서 식물플랑크톤 중 분포는 집괴분석의 결과(수상도는 생략하였음)와 같은 양상을 나타내었다. *S. costatum*(Sc), *L. danicus*(Ld), *P. pungen*(Pp), *L. mediteraneus*

(Lm), *Ch. spp.*(Cs) 및 *Ch. curvisetum*(Cc)와 같은 규조류는 조사 초기인 7월 중순(7월 18-22일)에 높은 출현을 보이고 영양염 농도와 관련성을 나타내었다. 와편모조류인 *K. breve*(Kb)는 투명도가 가장 높았던 8월 중순(8월 14-16일)에 높은 출현을 나타내었으며, 와편모조류인 *C. polykrkoides*(Cp)와 *P. schwartzii*(Ps)는 가장 고수온기였던 8월말(8월 27-30일)에 우점종으로 나타나 수온과의 높은 상관성을 잘 표현하였다.

### 고 찰

한반도 남해는 여름철에 표층부근에서 고온과 저염의 특성을 가지는 대마난류수(Tsushima Warm Current Water)와 상대적으로 저온과 고염을 가지는 남해연안수(Southern Sea Coastal Water)가 만나 연안에 가까운 해역에서 해양전선을 형성하며, 남해도 연안 해역의 식물플랑크톤의 군집 분포는 이 전선의 영향을 많이 받는다(박과 이 1990; 정 등 1999; 임 등 2002; Kang *et al.* 2002). 또한, 여름철에 한반도는 몬순의 영향으로 지속된 장마의 결과로 육상에서 다량의 영양염이 연안역으로 공급되어 연안역의 기초생산력이 높아지는 현상이 잘 알려져 있다(박 등 1988; Pae and Yoo 1991; Kang *et al.*, 1999). 특히, 장마철에 섬진강에서 나온 많은 육상 오염물과 광양만의 산업하수가 여수해만을 거쳐 외해로 유출될 때 이들 해역에서는 부영양화가 뚜렷해지며 이 과정에서 식물플랑크톤의 이상증식이 이루어지는 것으로 판단된다(Kim *et al.* 1990; Moon 1990; 이 등 1999; 이 등 2001a). 이와 같이 상대적으로 영양염 농도가 낮은 외양수의 연안 접근과 육수의 유입증가에 따른 부영양수의 영향은 이 해역의 해양 환경 변동과 함께 그에 따른 생물의 분포를 급격히 변화시킬 수 있다.

본 연구에서 사용한 CCA 분석은 각 정점과 우점종들을 직접적으로 도면상에 배열하여 표시하고, 환경요인들과 공통요인을 갖는 좌표축들 사이의 상관관계를 벡터로 나타내어 조사 정점의 식물플랑크톤 군집과 종의 분포와 환경요인과의 상호관계를 직접 관찰할 수 있는 분석법이다. 또한, 도면상에서 각 환경요인의 상관성이 벡터로 표시되어 이들의 영향력에 대한 비교가 가능하다.

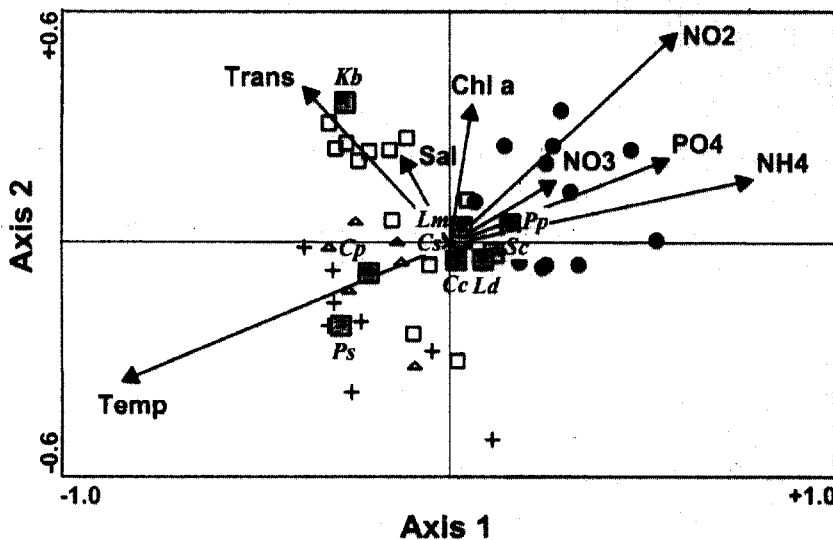
본 연구에서 나타난 CCA 분석 결과(Fig. 6)는 7월과 8월의 정점군이 도면상에서 CCA 축1에 의해 뚜렷이 구분된다는 것을 보였다. 7월 정점들은 NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> 및 PO<sub>4</sub>와 높은 상관관계를 가지며, 식물플랑크톤 중 규조류 종들(*Leptocylindrus mediteraneus*, *Chaetoceros spp.*, *Pseudonitzschia pungen*, *Skeletonema costatum*, *Leptocylindrus danicus* 및 *Chaetoceros curvisetus*)에 의해서 우점되는 것으로 나타났다. 일반적으로, 규조류는 와편모조류에 비해서

**Table 2.** Summary of the results from canonical correspondence analysis (CCA) of 39 cases of species occurrence for the phytoplankton communities around Namhae Island, July-August 2001, constrained to eight measured environmental variables

	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4	Total inertia
Eigenvalues	0.330	0.174	0.082	0.045	1.586
Species-environment correlations	0.880	0.686	0.759	0.529	
Cumulative percentage variance of species data	20.8	31.8	37.0	39.8	
of species-environment relation	47.5	72.7	84.5	91.0	
Sum of all unconstrained eigenvalues					1.586
Sum of all canonical eigenvalues					0.694

	Canonical coefficients		Interset correlations	
	Axis 1	Axis 2	Axis 1	Axis 2
Water temperature	-0.6858	-0.2430	-0.8490	-0.3543
Salinity	-0.1012	0.1567	-0.1252	0.2284
NO <sub>2</sub>	0.4754	0.3722	0.5886	0.5426
NO <sub>3</sub>	0.2218	0.1120	0.2745	0.1633
NH <sub>4</sub>	0.6345	0.1138	0.7854	0.1659
PO <sub>4</sub>	0.4603	0.1487	0.5698	0.2168
Chlorophyll <i>a</i>	0.0476	0.2463	0.0590	0.3591
Transparency	-0.3110	0.2786	-0.3850	0.4062



**Fig. 6.** Ordination diagram obtained from Canonical Correspondence Analysis (CCA). The arrows indicate the importance of each environmental variable included in the analysis. Temp = water temperature, Sal = salinity, Trans = transparency, Chl *a* = Chlorophyll *a*, ●, July 18-22; △, August 1-2; □, August 14-16; +, August 27-30; ■, Phytoplankton; Sc = *Skeletonema costatum*, Ld = *Leptocylindrus danicus*, Lm = *Leptocylindrus mediterraneus*, Cc = *Chaetoceros curvisetus*, Pp = *Pseudonitzschia pungens*, Ch = *Chaetoceros* spp., Kb = *Karenia breve*, Ps = *Polykrikos schwartzii*, Cp = *Cochlodinium polykrikoides*.

K(half-saturation constant)값이 높아 영양염 요구성이 크며, 이들의 급속 성장으로 영양염이 고갈되면, 영양염 농도가 낮은 환경에 잘 적응한 와편모조류 군집으로 천이가 일어난다고 알려져 있다(Banse 1982; Hecky and Kilham 1988; Furnas 1990; Smayda 1997). 8월초의 조사에서는 규조류 군집 자체에서도 종조성 변화를 나타내기 시작하였는데, 이것은 이 시기의 군집이 집괴분석과 CCA 분석에서 공통적으로 뚜렷하게 특징지어지지 않는다는 점에서 추론될 수 있다. 8월 중순과 8월 말의 조사정점에서 식물플랑크톤 군집에

서는 와편모조류에 의한 우점이 뚜렷하게 나타났다(Figs. 4, 5와 6). 이와 같은 현상은 위에서 이미 언급한 바와 같이 와편모조류는 규조류에 비해 낮은 무기 영양염농도에서도 빠른 증식을 할 수 있다는 사실에 의해서 설명될 수 있다 (Banse 1982; Hecky and Kilham 1988; Furnas 1990; Smayda 1997). 8월 중순에 우점으로 출현한 *Karenia breve*는 지금까지 한반도 연안에서는 적조를 일으킨 기록은 없으나, 대서양의 미국 연안 멕시코만에서 일어난 적조의 원인종이며, 어류의 폐사와 인간의 호흡기질환을 유발하는 등 심각한

한 피해를 일으키는 종으로 잘 알려져 있다(Geeseey and Tester 1993). 한편, 이종은 낮은 영양염 농도와 낮은 조도 하에서도 성장할 수 있는 전략적 생리·생태 잇점을 가지고 있어, 빈영양 환경에서도 고농도의 세포 밀도를 유지할 수 있고 그에 따라 비교적 쉽게 적조를 일으킬 수 있다. 따라서, 이종은 일반적으로 알려진 부영양성 외편모적조 종과는 달리, 외해에서 적조의 발생이 시작되어 유지되다가, 바람이나 해류의 이동에 의해 연안으로 이동되어 장기간 지속되는 것으로 보고되었다(Murphy *et al.* 1975; Tester *et al.* 1991; Steidinger *et al.* 1998). 또한, Smayda and Reynolds (2001)는 무각외편모조류(unarmored dinoflagellates)들의 생활형태(life type)에 따라 생리·생태 특징을 구분하였는데, 이 중 *K. breve*는 연안해류를 따라서 연안으로 이동되는 무리(Coastal Current Entrained Taxa)로 정리하였다. 정 등(2000)도 외해에 산재되어 있던 *Gyrodinium impudicum*과 *Cochlodinium polykrikoides*가 물리적인 힘에 의해 급속히 모여 적조를 이루었을 가능성을 제시한 바 있다. 본 조사에서 나타난 결과들도 연구 수역에서 *K. breve*와 *C. polykrikoides*의 발생이 해류와 같은 물리적인 요인과의 관련성을 강력히 시사해 주었다. 8월 중순의 남해도 주변 해양환경은 갑작스러운 무기 영양염 농도의 감소와 수온의 상승과 함께 높은 투명도 수심을 가진다(Table 1). 불과 10일간의 짧은 기간에 수온약층이 깨지거나 20m 이상 증가하는 것은 일반적인 자연환경의 변화에 의해서는 발생하기 어려운 것으로 판단된다. 그래서 동일해역에서 식물플랑크톤이 물리·화학적 영향을 받아 변화한 것이 아니라, 외부에서 다른 특성을 가진 해수(이질적인 수괴)가 그 해역으로 유입되어 식물플랑크톤의 군집이 완전히 바뀌었을 가능성이 높다. 이러한 결과는 여름철 대마난류수의 특성을 잘 반영하는 것으로(정 등 1999; 추와 김 1998; 김 등 1998b; 정 등 2000; 양 등 2000; 최 2001; Kang *et al.* 2002), 이 시기에 대마난류수가 연안으로 강하게 유입한 결과로 보인다. 또한, 수온전선이 연안으로 접근한 것과 *C. polykrikoides*의 적조발생 관련성은 인공위성에 의해 관측된 표층수온 분포자료에 의해서도 밝혀진 바 있다(서 등 2000; 임 등 2002).

8월 중순의 군집에서 우점하였던 *K. breve*는 곧 소멸하였고, 8월말의 조사에서는 *C. polykrikoides*로 빠른 천이를 보였다. *K. breve*는 넓은 범위의 온도구간에서 성장할 수 있고, 염분 농도에 따른 성장실험 결과는 31-37psu에서 최대 성장이 가능하다는 것을 보였지만, 현장의 30.5psu 조건에서 현저히 밀도가 감소하거나 소멸하는 것으로 나타났다(Rounsefell and Nelson 1966). 따라서, 가물이 진행되는 건기에 주로 발생하여 장마가 지속되는 우기에는 소멸하는 특징을 가져, 고염분에서만 성장 가능한 종(stenohaline)으로 추정되고 있다. 이에 반해, *C. polykrikoides*의 현장과 실험

내 실험 결과를 살펴보면, 수온에 대해서는 *K. breve*와의 최적 성장대와 유사한 범위를 나타내고, 염분에 있어서는 실험실에서 30-35psu에서 최대성장을 보이나(이 등 2001c), 현장의 관측결과에서 이들에 의한 적조가 발생했을 때의 염분은 대부분 32.5psu 이하이었다(김 등 1999). 한반도의 기후는 몬순의 영향으로 여름철에 강수가 집중되어 연안해역에서는 30psu 이하의 저염분이 나타나, *K. breve*의 생리적 특성상 적합한 환경이 되지 않을 수도 있다. 본 조사 기간에도 8월 중순에 남해에서 98.7mm가 내렸으며, 8월 중순부터 염분이 감소하여, 8월말의 조사에서는 평균 27.65(±4.95)psu로 *K. breve*의 성장에 적합하지 못한 환경이 조성되었을 것으로 보인다. 반면, 이와 같이 상대적으로 낮아진 염분 조건에서도 *C. polykrikoides*의 성장은 계속될 수 있을 것으로 추정할 수 있다. CCA 분석에서는 다소 미약하지만 *K. breve*와 염분사이의 상관성(Fig. 6)이 이와 같은 추론을 뒷받침한다.

한편, 8월 말의 조사에서 관찰된 *C. polykrikoides*에 의한 우점은 9월 24일까지 지속되었다(NFRDI 2002). 또한, 8월 말에 *C. polykrikoides*와 함께 출현한 *Polykrikos schwartzii*는 여러 종류의 외편모조류를 섭이하는 phagotrophic dinoflagellates의 일종으로 알려져 있다(Cho and Matsuoka 2000). 이 종은 또한 *C. polykrikoides* 적조가 발생하였을 때 흔히 함께 출현하며, *Cochlodinium* 적조가 사라져 가는 단계에서는 특히 그 개체수가 증가하는 경향을 나타내었다. 본 조사에서도 *C. polykrikoides*를 섭이하는 *P. schwartzii*의 공동 출현은 이와 같은 결과들에 의해서 설명될 수 있을 것으로 보인다.

이상에서 살펴본 바와 같이 연구 수역에서는 물리적 요인과 영양환경의 급격한 변화가 한국 남해 연안의 여름철 식물플랑크톤 군집의 단기변동에 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 본 연구에서 수행한 식물플랑크톤 조성과 그들의 환경요인에 대한 CCA 분석에서는 7월 중순에서 8월초에 나타난 규조류의 우점은 이들의 높은 영양요구성과 밀접하게 연관되어 있으며, 8월 중순에서 8월말에 걸친 외편모조류의 높은 출현 밀도는 수온, 투명도와 같은 물리 요인들과의 뚜렷한 상관성을 갖는 것을 잘 나타내어 주었다.

## 요 약

남해도 주변해역의 여름철 식물플랑크톤의 군집 구조를 2001년 7월 18-22일, 8월 1-2일, 8월 14-16일 및 8월 27-30일 4차례에 걸친 현장조사자료를 이용하여 분석하였다. 식물플랑크톤 군집의 변화에 영향을 미치는 환경요인인 표층 수온, 염분, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, Chlorophyll *a*와 투명도를 조사하였다. 식물플랑크톤 군집구조는 집괴분석(cluster analysis)으로 분석하였고, 군집구조와 환경요인과의 관계



를 canonical correspondence analysis(CCA)로 분석하였다.

1. 염분, NO<sub>3</sub>와 Chlorophyll *a*는 조사기간 동안 농도의 변화가 뚜렷하지 않았으나, 8월초에 NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>의 감소와 수온의 상승이 나타났다. 8월 중순에는 투명도가 증가하고, 수층이 불안정해지는 급격한 해양환경의 변화가 관찰되었다. 이와 같은 환경요인의 변동과 함께 식물플랑크톤의 군집구조도 큰 변동이 나타났다.

2. 조사기간 중 표층수에서 총 121종의 식물플랑크톤이 확인되었다. 이들은 규조류(diatom)가 72종, 와편모조류(dinoflagellates)가 48종, 유글레나류(euglenoid)가 1종으로 구성되었다. 식물플랑크톤의 우점종은 7월 중순(*S. costatum*과 *L. danicus*)과 8월초(*Ch. spp.*와 *L. danicus* 및 *E. zodiacus*)에는 규조류가 우점한 반면, 8월 중순(*K. breve*와 *C. polykrikoides*)과 8월말(*C. polykrikoides*와 *P. schwartzii*) 군집에서는 와편모조류가 우점하는 천이양상을 보여주었다. 이때 조사된 편모조류 종들의 우점양상은 서로 다르게 나타났다.

3. 우점종을 이용한 집괴분석 결과는 조사해역 식물플랑크톤 군집이 조사시기에 따라 크게 4개의 군으로 대별되는 것으로 나타나 시간의 경과에 따른 단기변동을 잘 보여 주었다.

4. 7월 중순에서 8월초에 나타난 규조류의 우점은 이들의 높은 영양요구성으로 보며, 8월 중순에서 8월말에 걸친 와편모조류의 높은 출현 밀도는 수온, 투명도와 같은 물리 요인들에 의한 결과로 볼 수 있다. 그러므로 물리 요인과 영양환경의 급격한 변화가 한국 남해 연안의 여름철 식물플랑크톤 군집의 단기변동에 큰 영향을 미칠 수 있다.

## 사 사

본 연구는 국립수산과학원의 경상연구과제 "적조에찰 및 예보연구"의 일부로 수행되었음을 밝힙니다. 논문의 심사를 맡아주신 심사위원님의 노고에 감사드립니다.

## 참고문헌

강영실, 전경암. 1999. 한국 남해 연안전선의 생물·화학적 특성 및 영양역학 구조. 한국수산학회지 32: 22-29.  
 강철중. 1974. 한국 남해안 연안수의 계절변동에 관한 연구. 수진연구보고 12: 107-121  
 공영. 1971. 한국 남해연안 전선에 관한 연구. 한국해양학회지 6: 25-36.  
 김성수, 고우진, 조영조, 이필용, 전경암. 1998a. 1996년 여름철 남해 표층수의 이상저염수 현상과 영양염류의 분포 특성. 한국해양학회지 바다 3: 165-169.  
 김동수. 2000. 한국 남해 중부 연안 어장에서 수괴의 계절 변화. 한

국어업기술학회지 36: 105-116.  
 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중. 1998b. 한국연안의 적조: 최근 적조의 발생원인과 대책. 국립수산진흥원 292 pp.  
 김학균, 최우정, 정영균, 정창수, 박종수, 안경호, 백철인. 1999. 나로도 인근해역에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생과 환경특성. 수진연구보고 57: 119-129.  
 김학균, 정창수, 임월에, 이창규, 김숙양, 윤성화, 조용철, 이삼근. 2001. 한국연안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 변천. 한국수산학회지 34: 691-696.  
 나정렬, 한상규, 조규대. 1990. 한반도 근해의 해류와 해수 특성 - 남해연안수 확장고 수온변화 -. 한국수산학회지 23: 267-279.  
 박주석, 이삼근. 1990. 한국남해의 식물플랑크톤의 분포와 수괴특성. 한국수산학회지 23: 208-214.  
 박주석, 김학균, 이삼근. 1988. 진해만의 적조현상과 원인생물의 천이. 수진연구보고 41: 1-26.  
 박철, 이창래, 김정창. 1998. 동해전선역 동물플랑크톤 군집: 2. 수온과 분포의 관계. 한국수산학회지 31: 749-759.  
 서영상, 김정희, 김학균. 2000. NOAA 위성자료에 의한 해수표면 수온분포와 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생의 상관성. 한국환경과학회지 9: 215-221.  
 심재형, 신윤근, 이원호. 1984. 광양만 식물플랑크톤분포에 관한 연구. 한국해양학회지 19: 172-186.  
 양영진, 김상현, 노홍길. 1998. 한국남·서해 및 동중국해 북부해역에 출현하는 수온전선. 한국수산학회지 31: 695-706.  
 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규. 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리·화학적 특성. 한국해양학회지 바다 5: 16-26.  
 이영식, 박종수, 김성수, 전경암, 김영숙, 박충현, 백철인. 1999. 여수 돌산도 동부연안에서 담수유입에 의한 수질 변화특성과 규조적조 발생. 수진연구보고 57: 111-117.  
 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박종수. 2001a. 광양만에서 식물플랑크톤 증식의 제한영양염. 한국해양학회지 바다 6: 201-210.  
 이영식, 박영태, 김영숙, 김귀영, 박종수, 고우진, 조영조, 박승윤. 2001b. *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생기작과 대책 1. *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 소멸의 환경특성. 한국해양학회지 바다 6: 259-264.  
 이창규, 김형철, 이삼근, 정창수, 김학균, 임월에. 2001c. 남해안 연안에서 적조생물, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gyrodinium impudicum*, *Gymnodinium catenatum*의 출현상황과 온도, 염분, 조도 및 영양염류에 따른 성장특성. 한국수산학회지 34: 536-544.  
 임월에, 정창수, 이창규, 조용철, 이삼근, 김학균, 정익교. 2002. 2000년 여름 남해안에 나타난 *Cochlodinium polykrikoides* 우점 적조의 발생 특성. 한국해양학회지 바다 7: 68-77.  
 정창수, 최우정, 김학균, 정영균, 김정배, 임월에. 1999. 1998년도 남해도 인근수역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 동물플랑크톤의 분포 특성. 수진연구보고 57: 153-161.  
 정해진, 박종규, 최현용, 양재삼, 심재형, 신윤근, 이원호, 김형섭, 조경제. 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구 2. 1997년도 식물플랑크톤의 시공간적 변화. 한국해양학회지 바다 5: 27-36.  
 조규대, 최용규. 1988. 대마난류 수형의 계절 변화. 한국수산학회지 21: 297-306.  
 추효상, 김동수. 1998. 한국 남해의 대마난류 변동이 멀치 난·자어

- 의 연안역 수층에 미치는 영향. 한국수산학회지 31: 226-244.
- 추효상. 2002. 하계 한국 남해의 해황 변동과 멸치 조기 생활기 분포특성. 한국수산학회지 35: 77-85.
- 최현용. 2001. 한국 남해 나로도와 소리도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조소멸과의 관계. 한국해양학회지 바다 6: 49-62.
- Banase K. 1982. Cell volumes, maximal growth rates of unicellular algae and ciliates, and the role of ciliates in the marine pelagial. *Limnol. Oceanogr.* 27: 1059-1071.
- Cho H.J. and Matsuoka K. 2000. Cell lysis of a phagotrophic dinoflagellate, *Polykrikos kofoidii* feeding on *Alexandrium tamarense*. *Plankton Biol. Ecol.* 47: 134-136.
- Furnas M. 1990. *In situ* growth rates of marine phytoplankton: Approaches to measurement, community and species growth rates. *J. Plankton Res.* 12: 1117-1151.
- Geesey M. and Tester P. 1993. *Gymnodinium breve*: ubiquitous in Gulf of Mexico waters? In: Smayda T.J. and Shimizu Y. (eds.), *Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea*, Elsevier Science Publishers B.V. pp. 251-255.
- Hecky R.E. and Kilham P. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. Oceanogr.* 33: 796-822.
- Kang C.K., Kim P.J., Lee W.C. and Lee P.Y. 1999. Nutrients and phytoplankton blooms in the Southern coastal waters of Korea: I. The elemental composition of C, N, and P in particulate matter in the Coastal Bay system. *J. Oceanol. Soc. Kor.* 34: 86-94.
- Kang Y.Q. and Jin M.S. 1984. Annual variation of salinity in the neighbouring seas of Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.* 19: 105-110.
- Kang Y.S., Kim H.G., Lim W.A., Lee C.K., Lee S.G. and Kim S.Y. 2002. An unusual environment and *Cochlodinium polykrikoides* blooms in 1995 in the South Sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.* 37: 212-223.
- Kim H.G., Park J.S. and Lee S.G. 1990. Coastal algal blooms caused by the cyst-forming dinoflagellates. *Bull. Korean Fish. Soc.* 23: 468-474.
- Lee J.C., Kim J.Y. and Chang S.D. 1984. Thermohaline structure of the shelf front in the Korea strait in early winter. *J. Oceanol. Soc. Korea* 19: 56-67.
- Lee S.G., Kim H.G., Cho E.S. and Lee C.K. 2002. Harmful algal blooms: Management and mitigation in Korea. *PICES Scientific Report* 23: 39-46.
- Moon C.H. 1990. Studies on the phytoplankton and nutrients in Yeosu Haeman. *Bull. Korean Fish. Soc.* 22: 408-414.
- Murphy M.B., Steidinger K.A., Roberts B.S., Williams J. and Jolley J.W. 1975. An explanation for the Florida east coast *Gymnodinium breve* red tide of November. *Limnol. Oceanogr.* 20: 481-486.
- NFRDI 2002. *Harmful algal blooms in Korean coastal waters from 2000 to 2001*. 158pp.
- Pae S.J. and Yoo S.J. 1991. Short term variability of the phytoplankton in Masan bay: I. Dynamics. *J. Oceanol. Soc. Korea* 26: 67-76.
- Parsons R.R., Takahashi M. and Hargrave B. 1984. *Biological Oceanographic Process*, 3rd ed., Pergamon Press, pp. 143-157.
- Rounsefell G.A. and Nelson W.R. 1966. *Red-tide research summarized to 1964 including an annotated bibliography*. U.S. Fish Wildl. Serv. Spec. Sci. Rep. Fish. 535. pp. 85.
- Smayda T.J. 1997. Harmful algal blooms: Their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. *Limnol. Oceanogr.* 42: 1137-1153.
- Smayda T.J. and Reynolds C.S. 2001. Community assembly in marine phytoplankton: application of recent models to harmful dinoflagellate blooms. *J. Plankton Res.* 23: 447-461.
- SPSS Inc. 1999. *SPSS Base 10.0 User's Guide*. Chicago, IL, USA.
- Steidinger K.A., Vargo G.A., Tester P.A. and Tomas C.R. 1998. Bloom dynamics and physiology of *Gymnodinium breve* with Emphasis on the Gulf of Mexico. In: Anderson D.M., Cembella A.D. and Hallegraeff G.M. (eds), *Physiological Ecology of harmful algal blooms*. Nato ASI Series No 41. pp. 133-153.
- ter Braak C.J.F. 1986. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* 67: 1167-1179.
- ter Braak C.J.F. and Smilauer P. 1998. *CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows: Software for Canonical Community Ordination (version 4)*, Microcomputer Power, Ithaca, NY.
- ter Braak C.J.F. and Verdonschot P.F.M. 1995. Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. *Aquatic Sciences* 57: 255-289.
- Tester P.A., Stumpf R.P., Vukovich F.M., Fowler P.K. and Turner J.T. 1991. An expatriate red tide bloom: Transport, distribution, and persistence. *Limnol. Oceanogr.* 36: 1053-1061.
- Yang H.S. and Kim S.S. 1990. A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea peninsula. *Bull. Korean Fish. Soc.* 23: 417-424.