

Article

아산만 식물플랑크톤의 계절별 군집 분포 특성

이상현¹ · 신용식^{1*} · 양성렬² · 박 철³

¹목포해양대학교 해양시스템공학부
(530-729) 전라남도 목포시 죽교동 571
²광주대학교 공과대학 환경공학과
(503-703) 광주광역시 남구 효덕로 52
³충남대학교 자연과학대학 해양학과
(305-764) 대전광역시 유성구 궁동 220

Seasonal Characteristics of Phytoplankton Distribution in Asan Bay

Sanghyon Yi¹, Yongsik Sin^{1*}, Sungryull Yang², and Chul Park³

¹Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University
Mokpo 530-729, Korea

²Department of Environmental Engineering, Colleg of Engineering
Kwangju University, Gwangju 503-703, Korea

³Department of Oceanography, College of Natural Sciences
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Abstract : Samples were collected from five stations in February, May, July, and September 2004 to investigate seasonal variations in the phytoplankton community and the relationship between dominant genera and environmental factors in Asan Bay. In February, microphytoplankton contributed 80% to the total chlorophyll *a*. Diatom dominated the phytoplankton community, accounting for 85.9% of the total cell number, followed by dinoflagellates (6%). Dominant species were *Skeletonema costatum* and *Thalassiosira* spp. Abundant diatom, including *S. costatum* and *Thalassiosira* spp., may be affected by water temperature and silicate at Station 1 and 2 in February 2004. In May, the nanophytoplankton contribution to total phytoplankton was higher than in other seasons. However, abundance of *S. costatum* and *Thalassiosira* spp. decreased, since the growth of *S. costatum* and *Thalassiosira* spp. might be limited by phosphates (P) resulting from low P concentration and a high DIN:DIP ratio in the outer region. In July, dominant phytoplankton groups were diatom (39%), cryptophyceae (28%), and cyanophyceae (20%). Dominant genera were *Oscillatoria* spp. and phytoflagellate of a monad type in the inner region (Station 1 and 2), whereas *S. costatum* was dominant in the outer region (Station 4 and 5). In September, dominant phytoplankton were diatom (69%) and cryptophyceae (28%). Dominant genera were phytoflagellate of the monad type, *S. costatum* in the inner region, while *Chaetoceros* spp. was dominant in the outer region.

Key words : 아산만(Asan Bay), 우점속(dominant genera), *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* spp., 식물플랑크톤 군집(phytoplankton community)

*Corresponding author. E-mail : yongsik@mmu.ac.kr

1. 서 론

수 환경에서 식물플랑크톤의 1차 생산력과 생체량은 생물 요인들과 비생물 요인들에 의해 조절된다. 생물 요인들은 상위소비자에 의한 섭식 등의 조절인자로서 하향식 조절(top-down control)이라 하며, 비생물 요인들은 영양염, 수온, 광량 등의 조절인자로 상향식 조절(bottom-up control)이라 하는데 이런 상향식과 하향식 조절의 중요성은 많이 논의되고 있다(Carpenter et al. 1987; Day et al. 1989; Kivi et al. 1993; Caraco et al. 1997; Sin et al. 1999).

식물플랑크톤의 현존량 그리고 우점종은 상향식과 하향식 조절인자에 의해서 민감하게 변화하기 때문에 수질에 대한 지표로 의미가 있으며 환경 요인에 따라 식물플랑크톤의 종 분포가 결정된다(UNESCO 1978). 식물플랑크톤의 종 구성이나 현존량은 환경의 시공간 변화에 따라 다르게 나타났으며(문 등 1991; 김 등 1998; 이 등 1998), 염분 차이가 큰 하구역에서는 염분과 계절에 따라서 종의 구성이 다르게 나타났다(Marshall and Alden 1990; 심 등 1991; 정 등 2000; 권 등 2001). 따라서 종의 구성이 바뀌었다는 것은 수온, 수피의 안정성, 영양염 등의 환경인자가 변화하였음을 의미하기도 한다.

여름에 우점하는 외편모조류는 높은 광량을 선호하며 느린 증식속도를 나타내고 있는 반면에, 겨울에 우점하는 규조류는 외편모조류에 비해 낮은 광량을 선호하며 빠른 증식속도를 나타내고 에너지 수용능력이 크다(Smayda 1980). 이와 같이 종에 따라 생물학적 특성이 다르게 나타나기 때문에 계절과 공간에 따라 출현하는 종이 다르

게 된다. 서해연안해역에서도 지역에 따라 우점종의 차이를 보이는데 경기만에서는 *Chaetoceros debilis*, *Ch. decipiens*가 우점하였으며 금강하구역에서는 *Coscinodiscus radiatus*, *Asterionella* spp., 태안반도 연안해역에서는 *Eucampia zodiacus*, *Asterionella glacialis* 등이 우점종으로 출현하였고, *Skeletonema costatum*은 아산만 뿐만 아니라 서해연안해역에서 계절과 수역에 관계없이 우점종으로 출현하였다(심 1994). 본 연구에서 2월에 우점종으로 출현한 *Skeletonema costatum*은 광염성, 광온성으로 기수역과 연안 해역에 널리 분포하는 종으로 알려져 있으며(Werner 1977) 규조적조생물로 연구되고 있다(유 등 2002; 이 2002).

본 연구는 식물플랑크톤 크기 및 군집에 대한 연구가 미흡한 아산만내 크기 구조를 고려한 군집구조와 우점속을 조사하고 분석함으로써 아산만의 식물플랑크톤 동역학(dynamics)을 파악하는 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

조사지점

조사 해역인 아산만은 길이 40 km, 너비가 2.2 km이며, 평균조차가 6.1 m 최대 9.6 m에 달하는 조석 간만의 차가 큰 개방형 만으로서, 겨울에는 대륙성 기후, 여름에는 해양성 기후의 영향이 뚜렷하다. 또한 삼포, 아산 및 대호 방조제 등이 건설되었으며, 앞으로도 연안유역을 따라서 대규모 국가 산업단지가 들어설 전망이어서 많은 연안환경의 변화가 예상되는 해역이다. 조사기간은 2004년

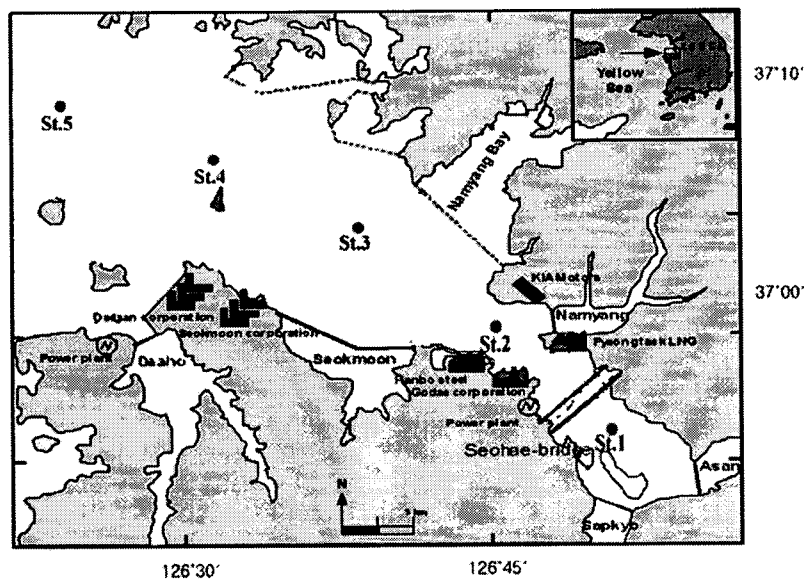


Fig. 1. Sampling stations in Asan Bay.

2월에서 9월까지 매월 실시하였으며 계절별 특성을 나타내는 2월, 5월, 7월, 9월을 선정하여 나타내었다. 조사 정점은 11개 정점에서 현장조사를 실시하여 공간적 분포를 나타낼 수 있는 5개 정점을 선정하여 분석하였다(Fig. 1).

조사방법

채수는 5 l Niskin 채수기와 Van Don water sampler를 이용하여 해수 표면 1 m 아래 수심(표층)에서 채수하였다.

수온, 염분(Salinity) 및 용존산소는 2004년 2월과 5월에는 YSI-6600을 이용했고 2004년 7월과 9월에는 YSI-Model 85 S-C-T 측정 장비를 이용하여, 수면에서 1 m 아래 수심에서 측정하였으며, 투명도는 Secchi disk를 이용하여 측정하였다.

Niskin 채수기를 이용하여 시료를 채수한 후 일정량을 Whatman® 25 mm GF/F filter를 통과시켜 여액을 20 ml plastic scintillation vial에 넣어 dry ice에 냉동 운반하여 -20°C 냉동보관 후 Parsons *et al.*(1984)에 준하여 AutoAnalyzer(Bran Luebbe®)를 이용하여 영양염을 분석하였다.

식물플랑크톤을 2개의 크기 즉 소형식물플랑크톤(>20 µm), 미소형식물플랑크톤(<20 µm)으로 분류하였다. 전체 식물플랑크톤의 chlorophyll *a* 농도를 측정하기 위해 펌프(<120 mmHg)를 이용하여 해수시료 100 ml를 유리섬유여과지(GF/F filter, 직경 25 mm, Whatman®, pore size 0.7 µm)로 필터하였다. 또한 크기 구분을 위하여 20 µm Nytex® mesh로 여과한 후 여액을 위의 방법(chlorophyll *a* 농도를 측정을 위한 필터방법)으로 유리섬유여과지를 이용하여 필터한다.

사용된 각각의 필터들을 클로로필 추출용액인 90% 아세톤(Acetone) 8 ml가 담긴 차광 시험관에 넣고 12시간이 지난 후 24시간 이내로 Turner Designs® 10-AU fluorometer를 사용하여 chlorophyll *a*를 측정하였고 그 후 바로 2N 염산(HCl)을 2~3방울 추가해서 산성화(acidification)에 따른 pheopigments의 양을 측정하여 Chl:Pheo(chlorophyll *a*:pheopigments)를 계산하였다. 일반적으로 상위소비자가 식물플랑크톤을 섭식한 후 pheopigments를 배설하거나 또는 어두운 채 장시간 노출되는 등의 환경악화로 인해 phytoplankton 자체에서 pheopigments를 생성하기 때문에 chlorophyll *a*와 pheopigments의 비를 통해 섭식의 포식압 내지는 자가산화 정도를 간접적으로 측정할 수 있다(Welschmeyer and Lorenzen 1985). 그러므로 chlorophyll *a*:pheopigments가 작으면 포식압이 높다는 간접적 의미를 나타낼 수 있다.

식물플랑크톤의 계수 및 동정을 위해 Lugol's solution (Sournia 1978)으로 고정한 후 Sedgewick-Rafter Chamber에 넣어 계수하였다. 현장에서 1 l 채수병에 해수 시료

900 ml와 Lugol's solution 5 ml를 넣어 잘 혼합하여 암실에서 약 2~3일 정도 자연침전시킨다. 순환 펌프를 이용해서 자연침전시킨 시료의 상등액을 제거하고, 남은 여액 200 ml를 잘 혼합한 후, 50 ml 용 시험관(Conical tube)에 넣고 약 1~2일 정도 농축시킨 다음 다시 45 ml 상등액을 제거하고 남은 5 ml중 1 ml를 S-R Chamber에 넣고 계수하였다. 계수는 영상 분석 장치 시스템(colored image analyzer)을 갖춘 Axioskop 2 MAT(ZEISS)를 이용하였다. 식물플랑크톤은 남조류, 규조류, 녹조류, 은편모조류, 유글레나류, 황색편모조류, 와편모조류로 총 7개의 그룹으로 분류하여 시공간에 따른 변화를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

환경요인

조사기간 동안 표층의 염분 변화를 보면 2월 28.8~30.7 psu, 5월 27.3~30.6 psu를 나타내었고 7월에 12.5~26.4 psu, 9월에 15.3~28.2 psu로 7월, 9월에는 조사해역의 염분이 낮으며 내, 외측해역의 염분 차이가 크게 나타났다(Fig. 2A). 이는 담수의 유입으로 인해 내측해역의 염분이 낮아졌으며 이런 담수의 영향은 외측해역까지 미친 것으로 사료된다. 수온의 변화를 보면 2월에 1.6~2.5°C, 5월에 13.2~15.4°C, 7월에는 19.2~21.8°C, 9월에 23.1~24.2°C로 2월에 낮게, 9월에 높게 나타났다. 계절에 따른 공간별 수

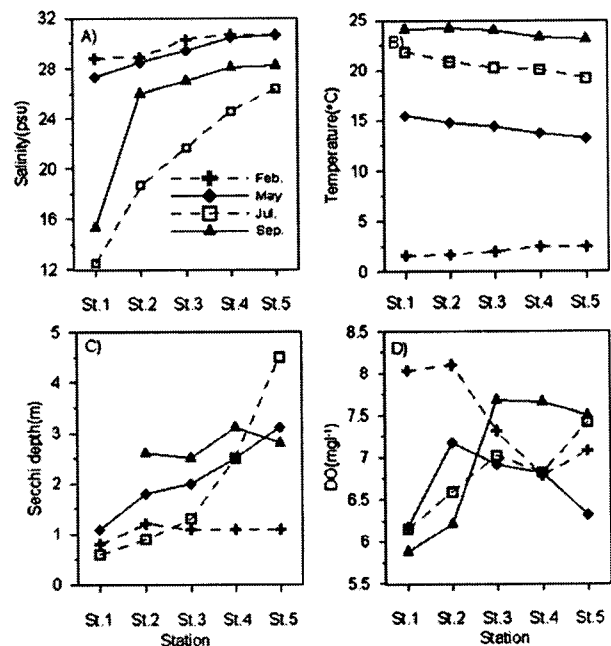


Fig. 2. Spatial variations of salinity, water temperature, secchi depth and dissolved oxygen during February, May, July and September in Asan Bay.

온차이는 크게 나타나지 않았으나 2월에는 외측해역으로 갈수록 증가하였으며 5, 7, 9월에는 외측해역으로 갈수록 감소하였다(Fig. 2B). 심 등(1991)의 보고에 따르면 겨울에는 정점간의 수온 차이가 적는데 비해 여름철로 갈수록 온도차이가 커지는 경향을 보였는데 아산만 조사에서도 그와 같은 수온 분포를 나타냈다. 투명도는 외측해역으로 갈수록 증가하는 경향을 보이며, 바람이 거세었던 2월은 기상조건 영향으로 모든 조사 정점에서 1.1 m 이하로 낮으며, 5월에는 1.1~3.1 m, 7월에는 0.6~4.5 m, 9월에는 2.5~3 m 범위를 나타냈다(Fig. 2C). 7월 내측해역의 낮은 투명도는 담수의 유입에 의한 탁도물질 증가에 따른 것으로 사료된다. 용존산소 농도는 2월에는 6.8~8.1 mg⁻¹의 범위로 내측해역에서 높았으며 5월에는 6.1~7.2 mg⁻¹의 범위로 정점 2, 3, 5에서 낮은 농도를 나타냈고 7월과 9월은 각각 6.2~7.4 mg⁻¹, 5.9~7.7 mg⁻¹의 범위로 내측해역

보다는 외측해역에서 높았다(Fig. 2D). 용존산소의 용해도는 수온에 따라 변화하기 때문에 여름에 낮게, 겨울에 높게 나타났으며 공간변화에 따른 용존산소의 변화는 크게 나타났었다. 2월을 제외하고 정점 1에서 낮은 분포를 보였는데 이는 인근 하수와 공단의 폐수 등 오염물질의 유입에 따른 박테리아의 활동으로 인해 산소 소모량이 증가하였기 때문으로 판단된다.

영양염 농도는 2월을 제외하고 외측해역보다 내측해역에서 높은 분포를 보이며 계절에 따라 5월에 낮았고 염분이 낮아지는 7, 9월에는 높았다(Fig. 3). 저염분역(내측해역)에서 고농도의 영양염 분포는 담수 유입의 증가에 따라 영양염이 공급되었기 때문으로 판단되며 이는 여수 둘산 해역(이 2002)과 섬진강 하구역(권 등 2004)에서도 보고되었다. 2월의 암모니아 농도는 공간적인 변화가 크지 않게 나타났으나 5월에는 외측해역으로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 7, 9월은 이와 반대로 외측해역으로 갈수록 감소하였다(Fig. 3A). 아질산염+질산염과 인산염의 농도는 2월을 제외하고 외측해역으로 갈수록 감소하였으며(Fig. 3B, 3C), 규산염의 농도는 조사기간 동안 외측해역으로 갈수록 감소하였다(Fig. 3D).

Redfield ratio(Redfield 1985)는 식물플랑크톤의 제한 영양염을 직접적으로 판단하는데 한계가 있지만 제한 가능성(potential) 있는 영양염을 파악하는데 일반적으로 사용된다. 아산만의 DIN:DIP는 모든 조사기간 동안 16 이상을 나타냈으며, 조류의 대발생이 일어났던 2월(Fig. 5 참조)에는 23~43의 범위로 다른 계절에 비해 낮은 비를 나타냈고 5월에는 가장 높은 비를 보였는데(Fig. 3E) 이는 5월 인산염의 농도가 0.02~0.2 μM의 범위로 다른 계절에 비해 낮게 나타났기 때문이다. 이러한 5월의 낮은 농도의 인산염은 식물플랑크톤 대발생이 종결되는데 있어 제한 영양염으로 작용할 가능성을 나타내고 있다. 7월의 DIN:DIP는 47~209의 범위로 내측해역에서는 낮게, 외측해역에서는 높게 나타났으며 9월에는 17~209의 범위로 정점 4를 제외하고는 낮게 나타났다.

Si:DIP는 2월의 정점 5에서 16.6으로 가장 낮게, 5월의 정점 4에서 386.9로 가장 높게 나타났었다(Fig. 3F). 2월에는 Si:DIP가 16.6~62.0의 범위로 외측해역으로 가면서 뚜렷하게 감소하여 정점 5에서는 16.6으로 상대적으로 낮았으며 규산염 분포도 외측해역으로 갈수록 낮은 농도를 보여 외측해역인 정점 5에서 규산염이 제한 영양염으로 작용할 가능성을 나타내는 것으로 판단된다. 5월에는 정점 2에서 43.1로 다른 정점에 비해 상대적으로 낮았고 정점 4, 5에서 높았다. 7월에는 5월과 비슷하게 정점 2와 3에서 낮았으며 외측해역에서 높았고 9월에는 정점 2에서 27.7로 낮게, 정점 4에서 384.5로 높게 나타났다.

포식압의 간접 지표로 사용되는 Chl:Pheo가 식물플랑

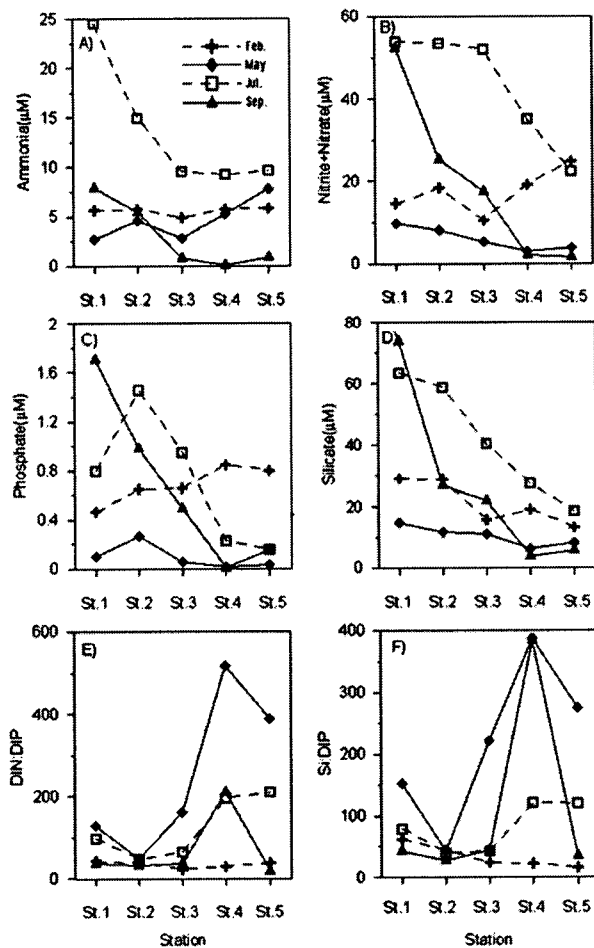


Fig. 3. Spatial distributions of ammonia, nitrite+nitrate, phosphate, silicate DIN:DIP and Si:DIP in surface water during February, May, July and September in Asan Bay.

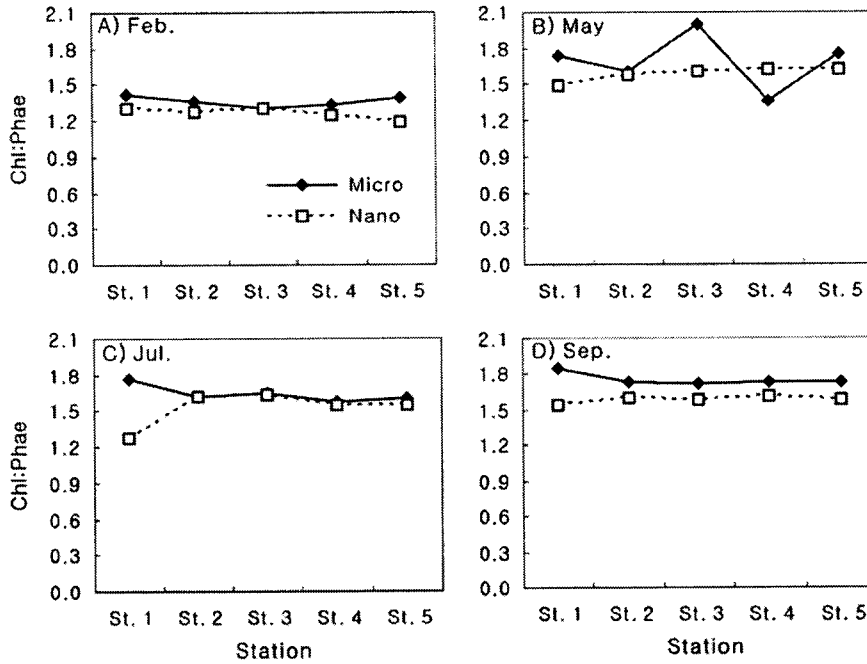


Fig. 4. Spatial variations of size-fractionated chlorophyll *a*:pheopigments during February, May, July and September in Asan Bay.

크톤의 대발생이 일어났던 2월에 1.2~1.5의 범위(Fig. 4A)로 다른 계절에 비해 낮게 나타난 것은 상위 소비자에 의한 포식압이나 환경악화로 인한 사멸이 높게 나타났음을 의미한다. 그러나 2월 chlorophyll *a*의 농도가 다른 계절에 비해 높게 나타난 것을 고려하였을 때 환경 악화에 의한 영향보다는 식물플랑크톤에 대한 섭식이 어느 정도 작용했을 것으로 판단된다. 2월 소형식물플랑크톤의 Chl:Pheo는 정점 3에서 낮게 나타났으나 미소형식물플랑크톤은 정점 3에서 높게 나타났고, 5월 Chl:Pheo의 변화를 보면 소형식물플랑크톤의 Chl:Pheo는 정점 3에서 높게, 정점 4에서 낮게 나타났으며 소형식물플랑크톤에 비해 미소형식물플랑크톤은 공간적인 변화가 작게 나타났고 (Fig. 4B). 7월 소형식물플랑크톤의 Chl:Pheo는 정점 1에서 높았으며 외측해역으로 갈수록 감소하는 경향을 나타냈고 미소형식물플랑크톤의 Chl:Pheo는 정점 2, 3에서 높았다(Fig. 4C). 9월 소형식물플랑크톤의 Chl:Pheo는 외측해역으로 갈수록 감소하는 경향을 보이며 미소형식물플랑크톤은 외측해역으로 갈수록 증가하는 경향을 나타냈다 (Fig. 4D).

크기별 식물플랑크톤 분포

전체 식물플랑크톤과 소형식물플랑크톤의 chlorophyll *a* 농도는 2월에 높게 나타났으며 특히 내측해역 정점 1, 2에서 높았고 외측해역으로 갈수록 감소하였다(Fig. 5A).

이러한 경향은 2월 표층 용존산소 농도에서도 나타났는데 (Fig. 2D) 식물플랑크톤의 광합성에 의한 영향으로 표층의

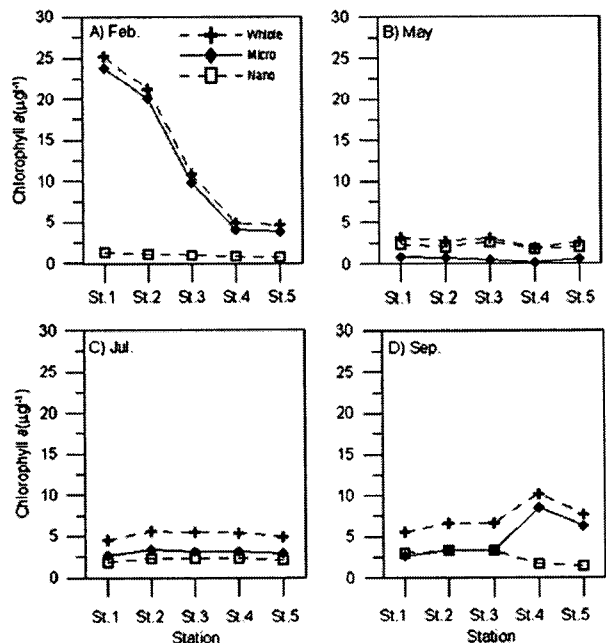


Fig. 5. Spatial variations of size-fractionated chlorophyll *a* (whole, micro- and nano-sized) during February, May, July and September in Asan Bay.

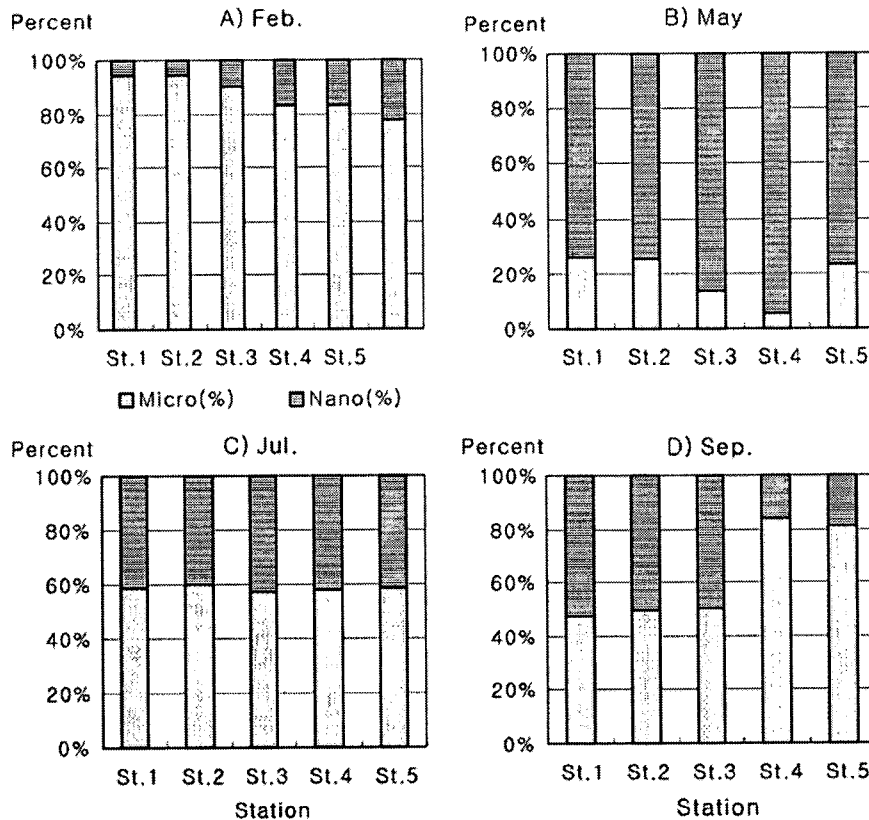


Fig. 6. Spatial variations of percentage contributions (%) of two size class (micro and nano) to the total chlorophyll *a* in the surface water in Asan Bay.

용존산소 농도가 증가한 것으로 판단된다. 소형식물플랑크톤의 기여율은 정점 1, 2에서 94.6%로 높았으며 전체 식물플랑크톤과 마찬가지로 외측해역으로 갈수록 감소하였다(Fig. 6A). 미소형식물플랑크톤의 기여율은 다른 계절에 비해 2월에 낮으며 외측해역으로 갈수록 높게 나타나고 있다.

5월에는 소형식물플랑크톤의 감소로 인해 전체 식물플랑크톤의 chlorophyll *a* 농도는 $1.9\sim 3.1\ \mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 의 범위로 2월에 비해 낮으나(Fig. 5B), 미소형플랑크톤은 2월에 비해 증가하여 $1.8\sim 2.6\ \mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 의 범위를 나타냈다. 전체 식물플랑크톤과 미소형식물플랑크톤은 상대적으로 정점 3에서 높았으나 공간적인 변화가 크게 나타나지 않았다. 소형식물플랑크톤은 외측해역에 비해 내측해역에서 높았으며 기여율은 2월에 비해 감소하여 정점 4에서는 5.7%로 낮았고 모든 정점에서 30% 미만으로 나타났다(Fig. 6B). 미소형식물플랑크톤의 기여율이 증가하여 다른 계절에 비해 매우 높게 나타났는데 이런 미소형식물플랑크톤의 높은 기여율은 chlorophyll *a* 농도가 2월 평균 $1.0\ \mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 에서 5월 $2.2\ \mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 로 증가한 영향도 있으나 소형식물플랑크톤이 2월에 $4.6\sim 25.12\ \mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 범위에서 5월에 $0.83\sim 0.1$

$\mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 범위로 감소하여 전체 식물플랑크톤의 농도가 낮았기 때문이다.

7월 전체 식물플랑크톤의 생체량은 $4.5\sim 5.6\ \mu\text{g}\text{L}^{-1}$ 의 범위로 5월 비해 높았으며 전체 식물플랑크톤과 소형, 미소형식물플랑크톤은 공간적인 변화가 크게 나타나지 않았다(Fig. 5C). 소형식물플랑크톤의 기여율이 57~60%로 5월에 비해 높았으며 공간적인 변화는 크게 나타나지 않았으나 정점 2에서 미소한 차이로 높았다(Fig. 6C). 미소형식물플랑크톤의 기여율은 소형식물플랑크톤과 마찬가지로 공간적인 변화가 크게 나타나지 않았다.

9월 전체 식물플랑크톤과 소형식물플랑크톤은 외측해역에서 높았고 미소형식물플랑크톤은 외측해역으로 갈수록 감소하였다(Fig. 5D). 2월 소형식물플랑크톤은 내측해역 정점 1, 2에서 높게 나타난 반면에 9월에는 정점 4에서 높았다. 전체 식물플랑크톤의 농도가 높았던 정점 4의 영양염 농도는 식물플랑크톤의 흡수로 인해 낮게 나타났으며 높은 DIN:DIP와 Si:DIP의 분포는 인산염의 농도가 매우 제한되고 있음을 나타내었다. 기여율은 생체량 분포와 마찬가지로 소형식물플랑크톤은 외측해역으로 갈수록 높았으며, 미소형식물플랑크톤은 외측해역으로 갈수록 낮았

다(Fig. 6D). 이러한 9월의 식물플랑크톤의 크기별 기여율 분포 경향은 2월과 반대로 나타났다.

계절적인 변화를 보면 전체 식물플랑크톤의 생체량은 2월에 높은 농도를 나타냈었으며, 소형식물플랑크톤도 2월에 높게 나타났으나 5월에 대폭 감소하여 0.83~1.0 $\mu\text{g l}^{-1}$ 범위를 보였고 다시 7월에서 9월로 가면서 증가하는 경향을 나타내었다. 미소형식물플랑크톤은 소형식물플랑크톤에 비해 계절에 따른 변화가 작게 나타났으나 2월에 상대적으로 낮은 농도를 보였고 모든 계절에서 4 $\mu\text{g l}^{-1}$ 이하로 나타났다.

전체 식물플랑크톤의 생체량이 낮을 때인 5월과 7월에는 미소형의 식물플랑크톤의 생체량이 높게 나타났다. 아산만과 비슷한 위도(37°)에 위치한 미국 동부의 York River에서도 전체 식물플랑크톤의 생체량이 작을 때 미소형식물플랑크톤의 생체량이 증가하는 경향을 나타내었

며, 전체 식물플랑크톤 생체량이 높을 때는 소형식물플랑크톤의 기여율이 높게 나타났다(Sin *et al.* 2000).

식물플랑크톤 우점속 및 그룹 분포

조사기간 동안 총 7개의 분류군(남조류, 규조류, 녹조류, 은편모조류, 유글레나, 황색편모조류, 와편모조류) 중에서 규조류가 우세하였으며, 특히 2월에는 85% 이상으로 높은 우점율을 보였고 우점율이 낮았던 7월에도 39%를 나타내었다(Fig. 7A, Table 1). 전체 식물플랑크톤과 소형식물플랑크톤의 생체량이 높았던 2월에는 굵고 기다란 주변 돌기환으로 세포들이 연결되어 사상균체를 이루는 *Skeletonema costatum*(Fig. 8A)과 키틴질의 사(糸)가 분비되어 세포들을 연결하여 균체를 이루는 *Thalassiosira* spp.(Fig. 8B)가 우점하였다(Table 2). *Skeletonema costatum* 과 *Thalassiosira* spp.는 고리, 월성, 울진 그리고 영광 연

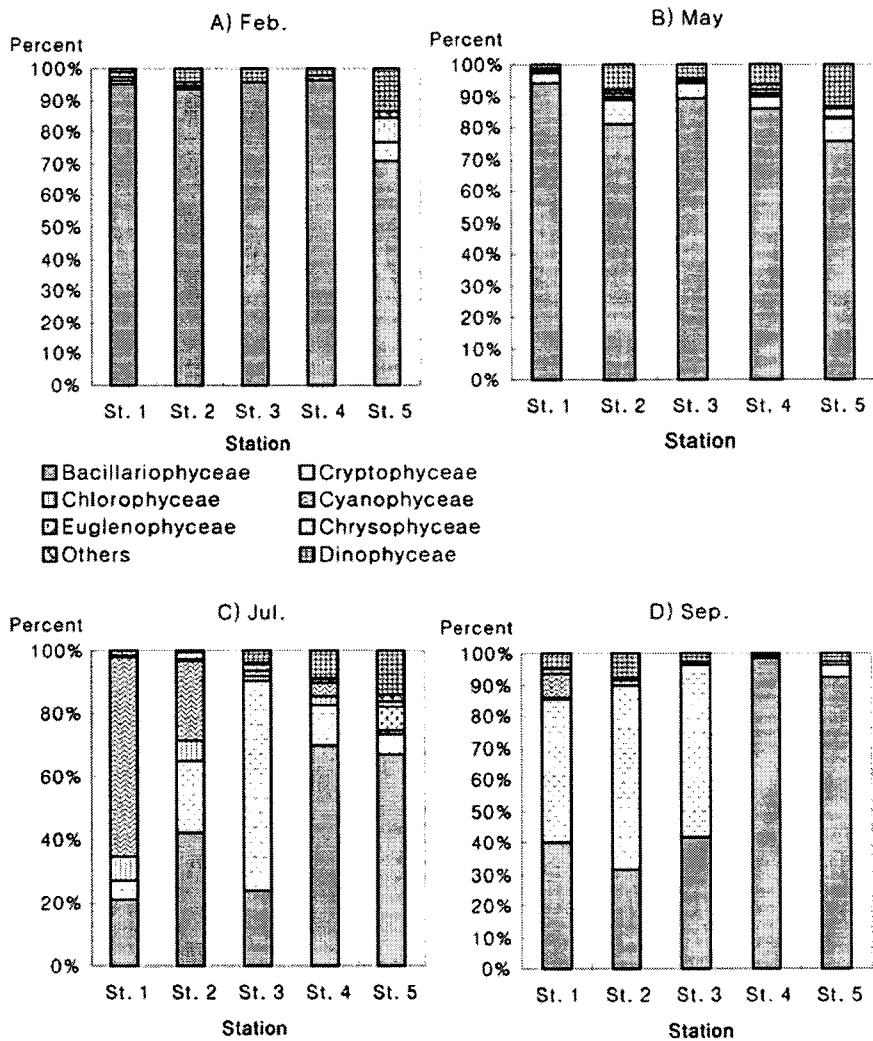


Fig. 7. Spatial variations of phytoplankton composition (%) during February, May, July and September in Asan Bay.

Table 1. Seasonal composition (%) of phytoplankton group during the sampling period from the study sites of Asan Bay.

Month	Cyano- phyceae	Bacillario- phyceae	Chloro- phyceae	Crypto- phyceae	Eugleno- phyceae	Chryso- phyceae	Dino- phyceae	Others
Feb.	0.52	85.9	0.52	0.65	0.52	0.65	6.0	5.22
May	0.29	85.11	0.17	5.19	0.51	0.89	6.89	0.93
Jul.	20	39.21	3.51	28.34	2.0	0.50	4.68	1.09
Sep.	1.08	68.52	0.07	26.17	0.62	0.42	3.06	0.05

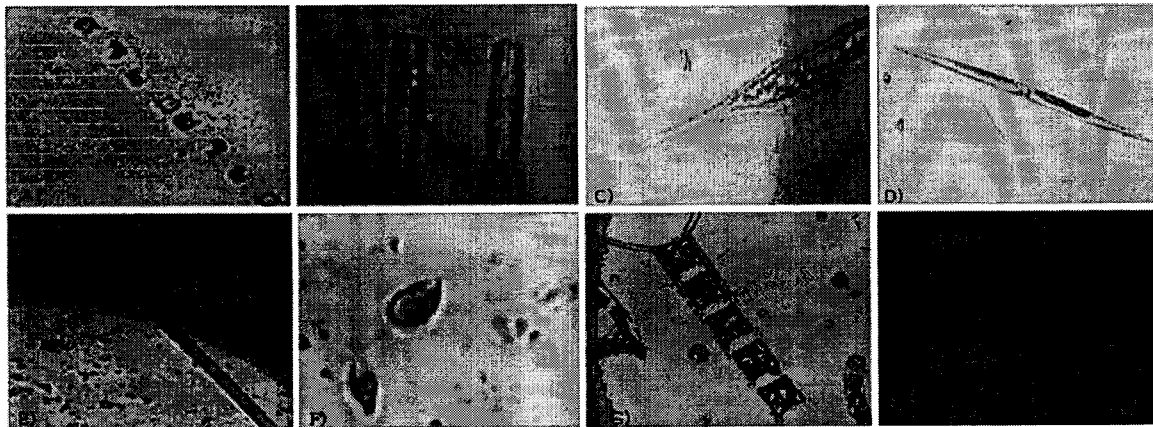


Fig. 8. Dominant genera of phytoplankton during February, May, July and September in Asan Bay (A: *Skeletonema costatum*, B: *Thalassiosira* spp., C: *Rhizosolenia* spp., D: *Pseudo-nitzschia* spp., E: *Oscillatoria* spp., F: phytoflagellate (monad type), G: *Chaetoceros* spp., H: *Chroomonas* spp.).

Table 2. Dominant and subdominant genera of phytoplankton community during the sampling periods at the 5 stations of Asan Bay.

Month	Station	Dominant spp.	Percentage (%)	Subdominant spp.	Percentage (%)
Feb.	St. 1	<i>Skeletonema costatum</i>	44.1	<i>Thalassiosira</i> spp.	24.4
	St. 2	<i>Thalassiosira</i> spp.	89.6	<i>Skeletonema costatum</i>	5.2
	St. 3	<i>Skeletonema costatum</i>	41.2	<i>Thalassiosira</i> spp.	39.2
	St. 4	<i>Thalassiosira</i> spp.	37.6	<i>Skeletonema costatum</i>	22.7
	St. 5	<i>Thalassiosira</i> spp.	37.6	<i>Skeletonema costatum</i>	9.4
May	St. 1	<i>Skeletonema costatum</i>	37.6	<i>Rhizosolenia</i> spp.	15.5
	St. 2	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	17.3	<i>Rhizosolenia</i> spp.	17.3
	St. 3	<i>Rhizosolenia</i> spp.	33.4	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	25.2
	St. 4	<i>Rhizosolenia</i> spp.	38.5	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	35.5
	St. 5	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	29.6	<i>Rhizosolenia</i> spp.	26.3
July	St. 1	<i>Oscillatoria</i> spp.	55.9	<i>Cylindrotheca</i> spp.	5.4
	St. 2	phytoflagellate (monad type)	29.4	<i>Oscillatoria</i> spp.	10.9
	St. 3	phytoflagellate (monad type)	64.9	<i>Skeletonema costatum</i>	7.2
	St. 4	<i>Skeletonema costatum</i>	21.1	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	20.0
	St. 5	<i>Skeletonema costatum</i>	29.4	<i>Cylindrotheca</i> spp.	7.3
Sep.	St. 1	phytoflagellate (monad type)	26.5	<i>Skeletonema costatum</i>	24.4
	St. 2	phytoflagellate (monad type)	30.5	<i>Chroomonas</i> spp.	25.6
	St. 3	phytoflagellate (monad type)	45.4	<i>Chaetoceros</i> spp.	17.8
	St. 4	<i>Chaetoceros</i> spp.	76.7	<i>Eucampia</i> spp.	2.9
	St. 5	<i>Chaetoceros</i> spp.	46.5	<i>Cylindrotheca</i> spp.	17.9

안해역(강 등 2003), 만경강 하류(심 등 1991) 그리고 낙동강 하구(조 등 1988)에서도 우점종으로 출현하였다. 또한 Smayda(1957)의 보고에 의하면 Narragansett Bay에서 늦여름과 겨울에 *S. costatum*의 우점율이 81% 이상으로 나타났다으며 Long Island Sound(Riley 1967)와 Willoughby Bay(Marshall 1967)에서도 *S. costatum*이 전체 종구성의 80%를 차지하였다.

일본의 1980~1984년까지 적조발생의 결과(岡市友利 1986)에서는 도쿄항을 중심으로 내만에서 발생한 *S. costatum*은 날씨에 따라 변동하는 세포수가 많고, 날씨의 영향은 1~2일 후까지 미치며 영양염 보다는 기후적인 조건이 크게 작용하는 것으로 판단하였다. 또한 *S. costatum*과 그 외 규조군의 배양실험을 통해서 규조군의 성장은 여름에 우점하는 외편모조류에 비해 빠르고, 이와 같은 증식력은 온도의 요인에 의해 영향을 받을 수 있으며(Yoder 1979b) 낮은 광량을 선호하고 더 큰 에너지 저장수용능력을 나타내었다(Smayda 1980). 이러한 연구 결과에서처럼 겨울철의 낮은 수온이나 광량은 2월 아산만에서 우점한 *S. costatum*의 성장에 어느 정도 영향을 주었을 것으로 판단된다.

2월을 제외한 다른 계절에는 암모니아, 아질산염+질산염, 인산염이 내측해역에서 외측해역으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었으나 2월에는 내측해역에서 외측해역으로 갈수록 높아지는 경향을 보여주고 있다(Fig. 3). 이는 2월 고농도의 식물플랑크톤이 영양염을 흡수하여 내측해역에서의 영양염 농도가 낮게 나타난 것으로 판단되며 이는 섬진강 하구역(권 등 2004)에서도 보고되었다. 그러나 다른 영양염의 분포와는 다르게 규산염의 분포는 내측해역에서 더 높은 농도를 보이고 있다. 즉 내측해역에서 영양염 제거가 일어났음에도 외측해역에 비해 높게 나타난 것은 내측해역의 농도가 풍부했거나 외측해역에서 낮은 농도를 보였다는 것을 의미한다. 또한 Si:DIP는 규산염과 비슷하게 외측해역으로 갈수록 감소하여 정점 5에서는 16.6으로 나타나고 있다. 이러한 규산염의 분포는 외측해역에서 상대적으로 낮은 농도를 보인 *S. costatum*과 *Thalassiosira* spp.에 영향을 준 것으로 판단된다.

5월에는 다른 계절에 비해 영양염의 농도가 낮았으며 인의 제한 정도는 높아졌다(Fig. 3). 이는 5월의 건기동안은 홍수기에 비해 담수의 유입을 통한 영양염 공급이 감소하였으며, 소형식물플랑크톤의 대발생으로 인해 영양염이 제거되었기 때문으로 사료된다(본문 중에 기재하지 않았으나 식물플랑크톤의 대발생은 4월까지 지속되었으나 5월 이후 대폭 감소하였고, 영양염의 분포는 4월부터 감소하여 5, 6월 낮은 농도를 보임). 이런 영양염의 낮은 농도 특히 인산염의 낮은 농도로 인해 2월에 우점하였던 *S. costatum*, *Thalassiosira* spp.의 성장이 제한되었을 것으로

여겨진다. 일본 하리마해역에서 영양염 농도와 식물플랑크톤 증식량과의 관계를 파악하기 위한 배양실험과 생리 분석 실험을 통해서 *S. costatum*의 성장에 있어 인이 중요한 제한 영양염으로 작용하였음을 보고한 바 있으며(岡市友利 1986) 국내의 배양실험에서도 인산염의 첨가에서 상대적으로 높은 농도를 보고하고 있다(권 등 2002). 또한 Marshall and Alden(1988)는 겨울과 봄에는 질소가 높게 나타나고 여름과 가을에는 인의 농도가 높게 나타나는 Chesapeake Bay에서 *S. costatum*를 포함한 규조류의 대발생이 일어난 겨울과 봄에 인 제한에 의한 영향이 클 것으로 보고하였다. *S. costatum*은 육지로 부어의 영양염 부하가 있는 연안부에 국한되어 있는데 연안에서 멀어 질수록 계속적으로 증가하기 위한 인산염의 양이 부족하기 때문이며(岡市友利 1986), 해수중의 인의 재생속도가 식물플랑크톤에 의한 흡수 속도 보다 작은 것도 원인이다.

2월과 마찬가지로 5월에는 규조류가 우세하게 점유하였으나 우점율이 낮고(Fig. 7B, Table 1), 단독성 원통상에 곧은 모양의 *Rhizosolenia* spp.(Fig. 8C)와 피침형으로 끝이 뾰족한 *Pseudo-nitzschia* spp.(Fig. 8D) 등이 우점속으로 출현하였으며(Table 2), 미소형식물플랑크톤이 높은 기여율을 나타내었다(Fig. 6B). 또한 *Nitzschia longissima*는 영광해역에서도 봄과 가을철에 주요하게 우점하였으며(강 등 2003). *Pseudo-nitzschia* spp.는 구조적조 생물로서 여수 지역에서 담수유입에 의한 영향으로 출현하였다(이 2002).

7월에 식물플랑크톤의 chlorophyll *a* 농도는 5월에 비해 증가하였으나 공간적인 변동은 크게 나타나지 않았다(Fig. 5C). 7월에는 소형식물플랑크톤의 기여율이 5월에 비해 증가하였으나 규조류의 우점율은 낮았으며, 남조류와 은편모조류가 높은 점유율을 나타내었다(Fig. 6C, Table 1). 정점 1에서는 남조류가 높은 점유율을 나타내었으며, 정점 3에서는 은편모조류가 높은 점유율을 나타내는 반면에 외측해역에서는 규조류의 우점율이 높게 나타났다(Fig. 7C). 정점 1에서는 남조류인 *Oscillatoria* spp.(Fig. 8E)가 55.9%로 우점하였으며, 정점 2, 3에서는 monad type의 phytoflagellate(Fig. 8F)가 우점하였다. 외측해역인 정점 4, 5에서는 규조류인 *S. costatum*이 우점하였다(Table 2). 이는 여름철 담수 유입에 의한 내측해역의 낮은 염분(Fig. 2A)으로 내측해역에서는 규조류가 아닌 *Oscillatoria* spp.와 monad type의 phytoflagellate가 우점한 것으로 판단된다.

9월 규조류의 군집은 7월 39.21%에 비해 현저히 증가하여 68.52%를 나타냈으며, 은편모조류가 26.17%를 나타냈다(Table 1). 내측해역에서는 소형식물플랑크톤과 미소형식물플랑크톤의 기여율이 비슷하게 나타났으나 외측해역에서는 소형식물플랑크톤이 80% 이상의 점유율을 나타

였으며 군집구조도 내측해역에서는 은편모조류가 우세하게 나타난 반면에 외측해역에서는 규조류가 높은 점유율을 나타내었다(Fig. 7D, Table 1). 9월에는 monad type의 phytoflagellate, *Chaetoceros* spp.(Fig. 8G), *Chroomonas* spp.(Fig. 8H)가 우점하였다(Table 2). *Chaetoceros* spp.는 영광, 울진, 고리해역(강 등 2003), 광양만(조 등 1994)에서도 우점속으로 출현하였다. 연안지역에서의 계절에 따른 군집 분포를 보면 여름에는 와편모조류(*Prorocentrum micans*, *Katodinium rotundatum*)가 주요종으로 출현하였으며, 가을에는 규조류(*Chaetoceros* spp., *S. costatum*), 겨울에도 규조류(*S. costatum*, *Thalassiosira* spp., *Pseudo-nitzschia* spp.)가 우점하였다(Smayda 1957). 부영양화된 담수의 경우도 겨울에는 미소형편모조류, 봄에는 규조류(돌말류), 여름에는 남조류, 가을에는 규조류(돌말류)가 우점하는 주기성을 보여주고 있다(Reynolds 1984). 아산만에서도 2, 5월에 규조류 *S. costatum*과 *Thalassiosira* spp., *Rhizosolenia* spp.와 *Pseudo-nitzschia* spp.가 우세하였고 내측해역의 염분이 낮았던 7월에는 내측해역에서 남조류(*Oscillatoria* spp.)와 은편모조류가 우점하였으며, 외측해역에서는 *S. costatum*이 우세하게 나타났다. 9월에는 염분이 낮은 내측해역에서 은편모조류(monad type의 phytoflagellate)가 우세하였고, 외측해역에서는 *Chaetoceros* spp.가 새로운 우점속으로 출현한 것으로 보아 겨울에는 규조류의 우점, 여름에는 남조류, 은편모조류가 우점, 가을에는 다시 규조류가 우점하는 경향을 나타내었다.

4. 요약

결론적으로 전체 식물플랑크톤과 소형식물플랑크톤의 생체량이 높았던 2월에는 규조류 *S. costatum*과 *Thalassiosira* spp.가 우점하였으며 특히 내측해역에서 높은 농도를 보였는데 이는 2월의 낮은 수온과 내측해역의 풍부한 규산염에 의한 영향으로 판단된다. 5월에는 전체 식물플랑크톤과 소형식물플랑크톤이 상당히 감소하였는데 이는 영양염의 감소 특히 인산염 제한에 의한 것으로 사료된다. 5월에는 미소형식물플랑크톤의 기여율이 높게 나타났고 규조류 *Rhizosolenia* spp.와 *Pseudo-nitzschia* spp.가 우점하였으나 2월에 비해 낮은 chlorophyll *a* 농도를 나타내고 있으며 이는 낮은 농도의 영양염 특히 DIN:DIP와 Si:DIP의 분포를 통해서도 알 수 있듯이 인산염의 농도가 크게 작용한 것으로 판단된다. 담수 유입으로 인해 내측해역의 염분이 낮았던 7월에는 소형식물플랑크톤이 평균 58.4%의 기여율을 보였으며, 미소형식물플랑크톤은 평균 32.6%의 기여율을 보여주고 있다. 또한 내측해역에서 monad type의 phytoflagellate와 남조류 *Oscillatoria* spp.가 우세하였고 외측해역에서는 *S. costatum*

이 우세하게 나타났다. 9월에는 7월과 마찬가지로 염분이 낮은 내측해역에서는 미소형식물플랑크톤의 기여율이 높았으며 monad type의 phytoflagellate가 우점하였고 외측해역에서는 소형식물플랑크톤의 기여율이 높았으며 규조류 *Chaetoceros* spp.가 새로운 우점속으로 출현하였다. 이와 같이 아산만의 환경적인 변화에 따라서 우점속의 변화를 가져왔으며 이런 우점속의 변화는 식물플랑크톤 군집의 계절적 변화를 나타내었다. 본 연구 결과는 식물플랑크톤 군집에 대한 연구가 부족했던 아산만의 식물플랑크톤 역학을 이해하는데 기여할 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2003-000-10080-0) 지원으로 수행되었습니다. 본 논문을 심사해주신 심사위원님들과 현장조사와 실험에 도움을 준 목포해양대학교 해양환경미생물실험실원들께 감사드립니다.

참고문헌

- 강연식, 최중기, 엄희문. 2003. 고리 월성, 울진과 영광 연안 해역에서 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성 III. 우점종 분포와 환경 요인들. *조류학회지*, 18, 29-47.
- 권기영, 김창훈, 강찬근, 문창호, 박미옥, 양성렬. 2002. 생물 집정실험에 의한 섬진강 하구역 식물플랑크톤 성장의 제한영양염 평가. *한국수산학회지*, 35, 455-462.
- 권기영, 문창호, 이재성, 양성렬, 박미옥, 이필용. 2004. 섬진강 하구역에서 영양염의 하구내 거동과 플럭스. *한국해양학회지 바다*, 9, 153-162.
- 권기영, 이평강, 박철, 문창호, 박미옥. 2001. 섬진강 하구역에서 염분경사에 따른 동식물플랑크톤의 현존량 및 종조성. *한국해양학회지 바다*, 6, 93-12.
- 김용재, 김명운, 김상중. 1998. 한강 중하류 수계에서 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성. *조류학회지*, 13, 331-338.
- 문창호, 최혜지. 1991. 낙동강 하구 환경특성 및 식물플랑크톤의 군집구조에 관한 연구. *한국해양학회지*, 26, 144-154.
- 심재형. 1994. 한국동식물동감 제 34권 식물편 해양식물플랑크톤. 15p.
- 심재형, 신윤근, 이원호. 1991. 만경강 하류의 환경과 식물플랑크톤 군집. *한국유수학회지*, 24, 45-54.
- 유영두, 정해진, 심재형, 박재연, 이경재, 이원호, 권효근, 배세진, 박종규. 2002. 전북 새만금 남쪽 해역의 유해성 적조 발생연구 1. 1999년도 여름-가을 식물플랑크톤의 시공간적 변화. *한국해양학회지 바다*, 7, 129-139.
- 이석구, 부성민. 1998. 아산 남방제에서 식물플랑크톤의 계절 변화. *한국유수학회지*, 31, 181-185.

- 이영식. 2002. 여수 돌산도 동부연안해역에서 담수 유입에 의한 구조적조 발생. *대한환경공학회지*, 24, 447-488.
- 정익교, 강영작, 권오섭, 서정관. 2000. 낙동강 하구 해역 식물플랑크톤의 군집동태. *조류학회지*, 15, 99-110.
- 조기안, 위인선, 최청일. 1994. 광양만 식물플랑크톤의 생태학적 연구. *한국환경생물학회지*, 12, 137-150.
- 조창환, 허성희. 1988. 낙동강 하구 부근의 식물플랑크톤 군집구조와 분포. *해양연구*, 10, 39-45.
- 岡市友利. 1986. 환경과학 특별연구 R14-11 연안생태계의 천이와 환경의 해역 특성. 145 p.
- Caraco, N.F., J.J. Cole, P.A. Raymond, D.L. Strayer, M.L. Pace, S.E. G. Findlay, and D.T. Fisher. 1997. Zebra mussel invasion in a large, turbid river: Phytoplankton response to increased grazing. *Ecology*, 78, 588-602.
- Carpenter, S.R., J.F. Kitchell, J.R. Hodgson, P.A. Cochran, J.J. Elser, M.M. Elser, D.M. Lodge, D. Kretchmer, X. He, and C.N. Von Ende. 1987. Regulation of lake primary productivity by food web structure. *Ecology*, 68, 1863-1876.
- Day, J.W. Jr., C.A.S. Hall, W.M. Kemp, and A. Yanez-Arancibia. 1989. *Estuarine Ecology*. John Wiley and Sons, New York. 147 p.
- Kivi, K., S. Kaitala, H. Kuosa, J. Kuparinen, E. Leskinen, R. Lignell, B. Marcussen, and T. Tamminen. 1993. Nutrient limitation and grazing control of the Baltic plankton community during annual succession. *Limnol. Oceanogr.*, 38, 893-905.
- Marshall, H.G. 1967. Phytoplankton in James River estuary, Virginia: I. Phytoplankton in Willoughby Bay and Hampton Roads. *Chesapeake Sci.*, 8, 90-92.
- Marshall, H.G. and W.A. Raymond. 1988. Spatial and temporal diatom assemblages and other phytoplankton within the lower Chesapeake Bay, USA. Diatom symposium.
- Marshall, H.G. and W.A. Raymond. 1990. A comparison of phytoplankton assemblages and environmental relationships in three estuarine river of the lower Chesapeake Bay. *Estuaries*, 13, 287-300.
- Parsons, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli. 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, New York. 22-25p.
- Redfield, A.C. 1985. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.*, 46, 205-255.
- Reynolds, C.S. 1984. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater Biol.*, 14, 111-114.
- Riley, G.A. and S.M. Conove. 1967. Phytoplankton of Long Island Sound, 1954-1955. *Bull. Bingham Oceanogr. Coll.*, 19, 5-34.
- Sin, Y., R.L. Wetzel, and I.C. Anderson. 1999. Spatial and temporal characteristics of nutrient and phytoplankton dynamics in the York River, Virginia: analyses of long-data. *Estuaries*, 22, 260-275.
- Sin, Y., R.L. Wetzel, and I.C. Anderson. 2000. Seasonal variations of size-fractionated phytoplankton along the salinity gradient in the York River estuary, Virginia. *J. Plankton Res.*, 22, 1945-1960.
- Smayda, T.J. 1957. Phytoplankton studies in lower Narragansett Bay. *Limnol. Oceanogr.*, 2, 342-359.
- Smayda, T.J. 1980. Phytoplankton species succession. p. 493-570. In: *The physiological ecology of phytoplankton*. ed. by I. Morris. Blackwell, Oxford.
- Sournia, A. 1978. *Phytoplankton manual*. Monographs on Oceanographic Methodology 6. UNESCO, Paris. 337 p.
- UNESCO. 1978. *Water quality surveys*. UNESCO. WHO. 350 p.
- Welschmeyer, N.A. and C.J. Lorenzen. 1985. Role of herbivory in controlling phytoplankton abundance: Annual pigment budget for a temperate marine fjord. *Mar. Biol.*, 90, 75-86.
- Werner, D. 1977. *The Biology of Diatoms*. Blackwell Scientific Publications. 498 p.
- Yoder, J.A. 1979. A comparison between the cell division rate of natural populations of the marine diatom *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve grown in dialysis culture and that predicted from a mathematical model. *Limnol. Oceanogr.*, 24, 97-106.

Received Apr. 11, 2005
Accepted May 23, 2005