

아산만 식물플랑크톤 크기구조의 시·공간적 변동

현봉길 · 신용식* · 박 철¹ · 양성렬² · 이영준³

목포해양대학교 해양시스템공학부, ¹충남대학교 해양학과,
²광주대학교 환경공학과, ³국립환경연구원 영산강물환경연구소

Temporal and Spatial Variations of Size-structured Phytoplankton in the Asan Bay

Bongkil Hyun, Yongsik Sin*, Chul Park¹, Sungryull Yang² and Young Joon Lee³

Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University

¹*Department of Oceanography, Chungnam National University*

²*Department of Environmental Engineering, Kwangju University*

³*Yongsan-River Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research*

Abstract – Samples were collected from five stations monthly from October 2003 to September 2004 to investigate seasonal variation of size structure of phytoplankton and relationship between size-fractionated phytoplankton and environmental factors in the Asan Bay. The contribution of large cells (microphytoplankton, >20 μm) to total concentrations of chlorophyll *a* was higher than small cells (nanophytoplankton, 3~20 μm; picophytoplankton, <3 μm) during the sampling period. Especially, large cells contributed 80% to the total chlorophyll *a* from February, 2004 to April 2004 when chlorophyll *a* concentrations were high. The size structure of phytoplankton shifted from micro-size class to nano-size class and picophytoplankton rapidly increased when phytoplankton biomass decreased in May 2004. Microphytoplankton exhibited a high biomass in the upper region during winter-spring season whereas nano- and picophytoplankton showed two peaks in the middle-lower regions (Station 3, 5) during spring and summer. Microphytoplankton are most likely controlled by water temperature and nutrient supply during the cold season whereas nano- and picophytoplankton may be affected by stratification, light exposure during the warm season.

Key words : Asan Bay, size-fractionated phytoplankton, controlling factors

서 론

연안 해양 생태계 먹이 사슬에서 식물플랑크톤은 일차 생산자로서 상위 영양단계를 구성하는 종속영양체 및 어업 생산량에 영향을 미칠 뿐만 아니라 탄소와 영

양염류의 순환에도 중요한 역할을 담당한다 (Kemp and Boynton 1981; Sundback *et al.* 1990). 영양염류가 풍부한 연안하구 (estuary)는 일차생산량이 갑자기 증가하는 경우가 발생하는데, 이때 식물플랑크톤의 생물량을 제어하는 동물플랑크톤 등의 포식자들의 반응이 늦어져서 대발생을 형성하게 된다. 대발생이 일어나면 식물플랑크톤은 스스로 광 (light) 흡수인자로서 작용하여 빛의 투과를 막

* Corresponding author: Yongsik Sin, Tel. 061-240-7054, Fax. 061-240-7284, E-mail. yongsik@mmu.ac.kr

아 자신들의 성장을 방해하고 (self-shading, Kirk 1994), 포식되지 않고 바닥에 가라앉은 식물플랑크톤은 미생물 대사 작용에 의해서 저층의 용존산소를 고갈시켜서 빈 산소층을 형성하여 수질을 악화시키는가 하면 (Sundback *et al.* 1990), *Alexandrium tamarense* 등의 독성을 가지는 조류 등은 적조를 일으켜 수생태계 및 수산업에 치명적인 피해를 입히기도 한다 (Harper 1992). 1차 생산을 담당하는 식물플랑크톤의 동역학 (dynamics)을 보다 자세히 이해하기 위해서 크기 구조에 따라 식물플랑크톤을 연구할 필요가 있는데 이는 세포 (cell)의 크기는 환경 변화에 따른 식물플랑크톤 군집의 반응 민감도와 (Malone and Chervin 1979; Hein *et al.* 1995; Sin and Kim 2003) 연안 생태계 먹이사슬에 대한 영향을 결정하기 때문이다.

조사 해역인 아산만은 길이 40 km 너비가 2.2 km이며, 평균조차가 6.1 m 최대 9.6 m에 달하는 우리나라에서 가장 조석 간만의 차가 큰 개방형만으로서, 기후는 계절에 따라 겨울에는 대륙성 기후, 여름에는 해양성 기후의 영향이 뚜렷하며, 기온은 연평균 11.5°C, 강우량은 연평균 1,196 mm를 나타내고 있다. 또한 삼교, 아산 및 대호 방조제 등의 건설되었으며, 앞으로도 연안유역을 따라서 대규모 국가 산업단지가 들어설 전망이어서 많은 연안환경의 변화가 예상되어지는 해역이다. 특히 방조제 건설 이후 전기에는 담수의 유입이 통제되어지나, 우기에는 저장되어있던 담수가 일시에 방출되어 만내 환경 및 생물상에 영향을 미칠 것이라 사료된다 (문 등 1993). 이러한 환경 변화가 예상되는 해역에서 수층의 일차생산자이며 환경변화에 대해 민감하게 반응하는 식물플랑크톤에 대한 연구는 중요하다고 하겠다.

지금까지 아산만 연안의 환경변화 조사로는 동물플랑크톤 분포에 관한 연구 (Park *et al.* 1991), 저어류에 관한 연구 (이 1991), 아산만 영양염 및 입자성 유기물에 관한 연구 (문 1993)가 이루어 졌지만 크기 구조에 따른 식물플랑크톤의 분포 특성에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 아산만내 크기 구조에 따른 식물플랑크톤 생물량의 시·공간적 분포 특성 및 식물플랑크톤 생물량과 여러 환경인자들과의 관계를 파악해서 향후 효율적인 수질관리를 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

재료 및 방법

현장조사는 2003년 10월부터 2004년 9월까지 매일 아산만 5개 정점을 선정하여 만조시에 내만에서 외만으로 해수층의 염분 변화에 중점을 두어서 조사를 실시하였다 (Fig. 1). 채수는 5L 니스킨 채수기와 반돈 채수기를 이용하여 표층 (해수 표면에서 1 m 아래)과 저층 (퇴적층에서 1 m 위)에서 실시하였다.

조사기간 동안 강수량 및 일조시간은 천안시 기상청 자료를 이용했으며, 아산 및 삼교 방조제 배출량은 경기도 평택시와 충남 아산시 농업기반공사의 자료를 이용하였다.

1. 물리적 환경 (광도, 수온, 염분)인자 및 용존산소

수층의 빛 강도를 측정하기 위해 수심 10, 35, 60, 85,

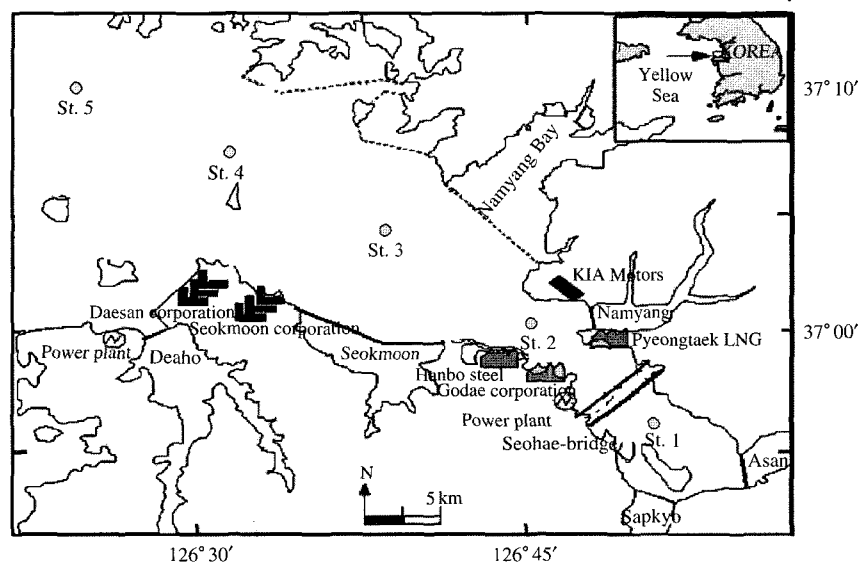


Fig. 1. Sampling stations in the Asan Bay.

110 cm에서 수중 광량계 (LI-COR PAR Quantum Radiometer)를 사용하였다. 광 소산계수 (Light attenuation coefficient)는 Beer's Law ($I_z = I_0 e^{-kz}$)를 이용하여 계산하였다.

수온, 염분 및 용존산소는 현장에서 2003년 10월부터 2004년 6월까지 YSI-6600, 2004년 7월부터 9월까지 YSI-Model 85 S-C-T 측정 장비를 이용하여 표층과 저층에서 수온, 염분 및 용존산소를 측정하였다.

2. 화학적 환경 (무기 영양염)인자

표층과 저층에서 Niskin 채수기를 이용하여 채수한 후 시수 일정량을 직경 25 mm 여과지 GF/F filter를 통과시킨 여액을 20 mL plastic scintillation vial에 넣어 dry ice로 냉동 보관 후 실험실로 운반하였다. 운반되어진 시료는 분석 전까지 -20°C 냉동보관 후 Parsons *et al.* (1984)의 방법에 따라 영양염 자동분석기 (AutoAnalyzer (Bran Luebbe®))를 이용하여 분석하였다.

3. 엽록소 a 측정

본 연구에서는 식물성 플랑크톤을 3개의 크기로 분류하여 분석하였다: micro-size ($> 20 \mu\text{m}$), nano-size ($3 \sim 20 \mu\text{m}$) 그리고 pico-size ($< 3 \mu\text{m}$). 이 분류를 위해 $20 \mu\text{m}$ Nytex mesh, $3 \mu\text{m}$ ester membrane filters를 이용해서 채수된 해수 시료 적당량 ($20 \mu\text{m}$: 200 mL, $3 \mu\text{m}$: 300 mL)을 펌프 ($< 120 \text{ mmHg}$)를 사용해서 여과 한 후에, 여과되어진 여액을 유리 섬유 여과지 (GF/F filter, 직경 25 mm, Whatman, pore size $0.7 \mu\text{m}$)를 이용해서 여과 하였으며,

전체 엽록소 (Chlorophyll *a*)는 채수된 해수시료 100 mL를 유리 섬유 여과지로 여과 하였다. 사용된 여과지들은 엽록소 추출용액인 90% 아세톤 (Acetone) 8 mL가 담긴 차광 시험관에 넣고 12시간 이상 24시간 이내에 형광광도계 (Turner Designs 10-AU Fluorometer)를 사용하여 측정하였다.

4. 통계 처리 방법

환경인자들과의 유의성 관계 파악을 위해 linear regression (Microsoft Excel)을 이용하여 염분, 수온, 영양염 등을 포함한 환경인자들이 크기별 식물플랑크톤에 미치는 영향을 파악 하였다.

결 과

1. 물리적 환경인자

2003년 10월부터 2004년 9월까지 아산만의 강수량 분포를 보면 갈수기인 가을과 겨울에 적었으며, 우수기인 여름으로 갈수록 증가하여 우리나라 다른 지역들과 유사한 경향을 나타내었다 (Fig. 2A). 아산만 월 합 일조 시간은 봄과 가을에 길고 여름과 겨울에 짧은 계절적 특성을 나타내었다 (Fig. 2A). 아산 및 삼포 방조제로부터 만대로 유입되어지는 담수 유입량은 태풍이나 장마 등에 의해서 집중 호우가 내렸던 여름인 7월 646,640 (천톤)과 가을인 9월에 362,342 (천톤)으로 많은 양의 담수가 유입됨을 확인할 수 있었다 (Fig. 2B).

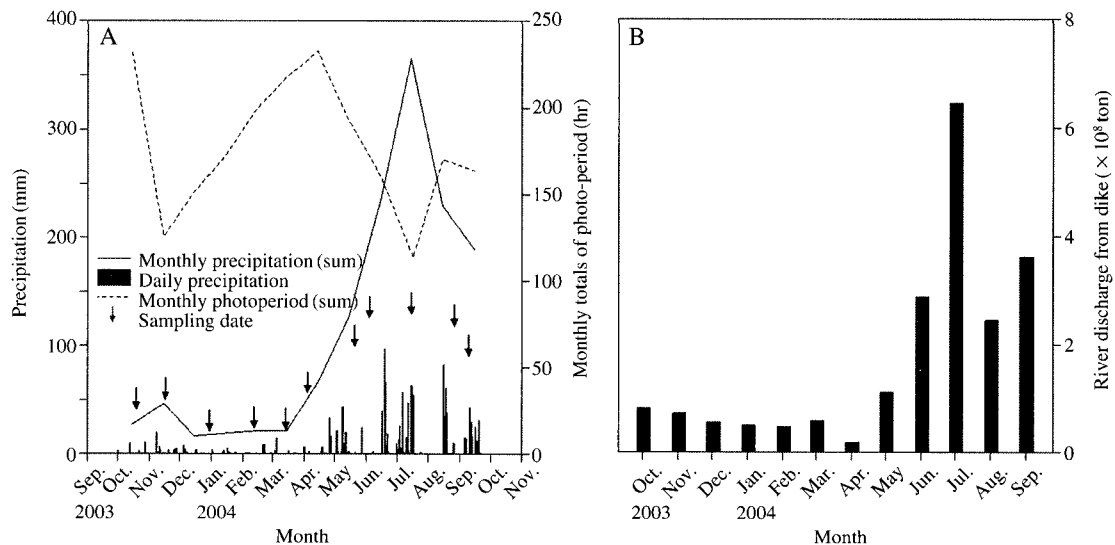


Fig. 2. Photo-period (monthly sum), precipitation (daily and monthly sum) and freshwater river discharge (monthly sum) from the Asan and Sapkyo embankment.

염분의 계절적 분포를 보면 겨울과 봄 동안에는 표층과 저층에서 비슷한 염분 분포를 보였으며, 여름으로 갈수록 표층이 저층보다 낮은 염분 분포를 나타내었다 (Fig. 3A-C). 특히 강수량이 집중되는 여름인 7월 표층에서 약 15 psu로 낮은 분포를 보였다 (Fig. 3A). 염분의 공간적 분포를 보면 내측해역에서 낮고 외측해역으로 갈수록 염분농도가 증가하는 경향을 보였고 특히 여름인 7월에 이러한 경향이 잘 나타났다 (Fig. 3A-C).

수온은 기온이 낮은 겨울과 봄 동안에 표층과 저층에서 비슷한 수온 분포를 보였으며, 여름으로 갈수록 표층이 저층보다 높은 수온 분포를 보였다 (Fig. 3D-F). 공간적으로는 내측과 외측해역에서 비슷한 분포를 보였다.

부유물질 및 식물플랑크톤 대발생에 의해서도 영향 (self-shading)을 받는 광 소산계수 (K_d)의 계절적인 분포는 내측 해역인 정점 1에서 3월에 2.2 m^{-1} 로 가장 높은 광 소산계수를 나타내었다 (Fig. 3G). 공간적으로는 담수의 유입이 많았던 7월 내측해역에서 높고, 외측해역에서 낮은 경향을 보였다 (Fig. 3G-I).

담수의 유입에 따른 성층의 영향을 조사하기 위해서 표층과 저층의 염분 농도 차이와 크기별 식물플랑크톤의 생물량을 비교하였다 (Fig. 4). 전체와 소형식물플랑크톤은 표층과 저층의 염분 농도 차이의 분포와 별다른 연관성을 나타내지 않았으나 (Fig. 4A-F), 미소 및 초미세 식물플랑크톤은 염분 차이가 증가할수록 생물량이 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 4G-L).

2. 화학적 환경인자

용존산소의 계절별 분포를 보면 겨울에서 여름으로 갈수록 감소하는 경향을 보였으며, 7월 내측해역인 정점 1에서 표층보다 저층에서 더 높은 용존산소 분포를 나타낸 것을 제외하고는 표층이 저층보다 높은 용존산소 농도 분포를 보였다. 공간적으로는 수온이 낮은 겨울에 내측해역이 외측해역보다 높은 용존산소 분포를 보였으며, 수온이 높은 여름에는 외측해역이 내측해역보다 높은 용존산소 분포를 나타내었다 (Fig. 5A-C). 또한 모든

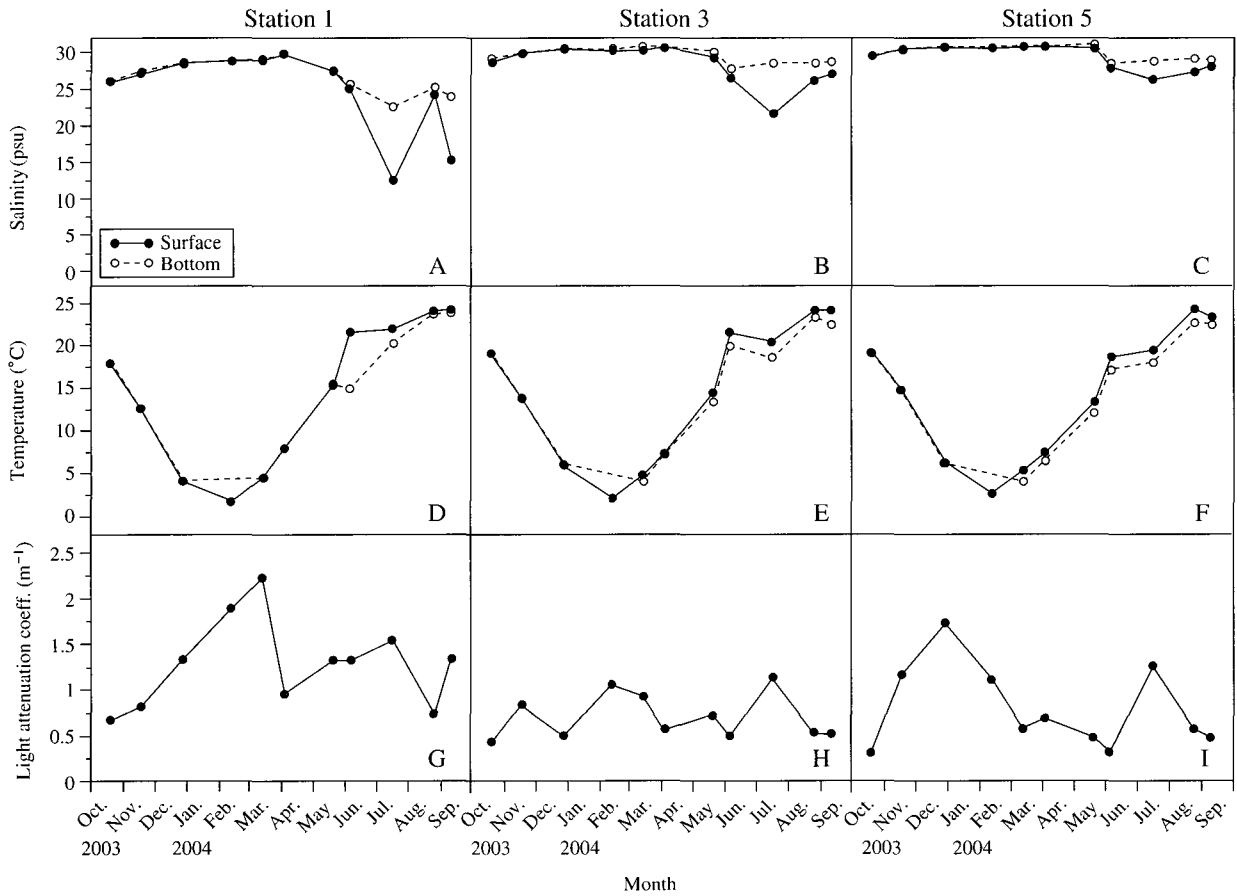


Fig. 3. Temporal variations of Salinity, water temperature and light attenuation coefficients (K_d) at three stations along the axis of the Asan Bay.

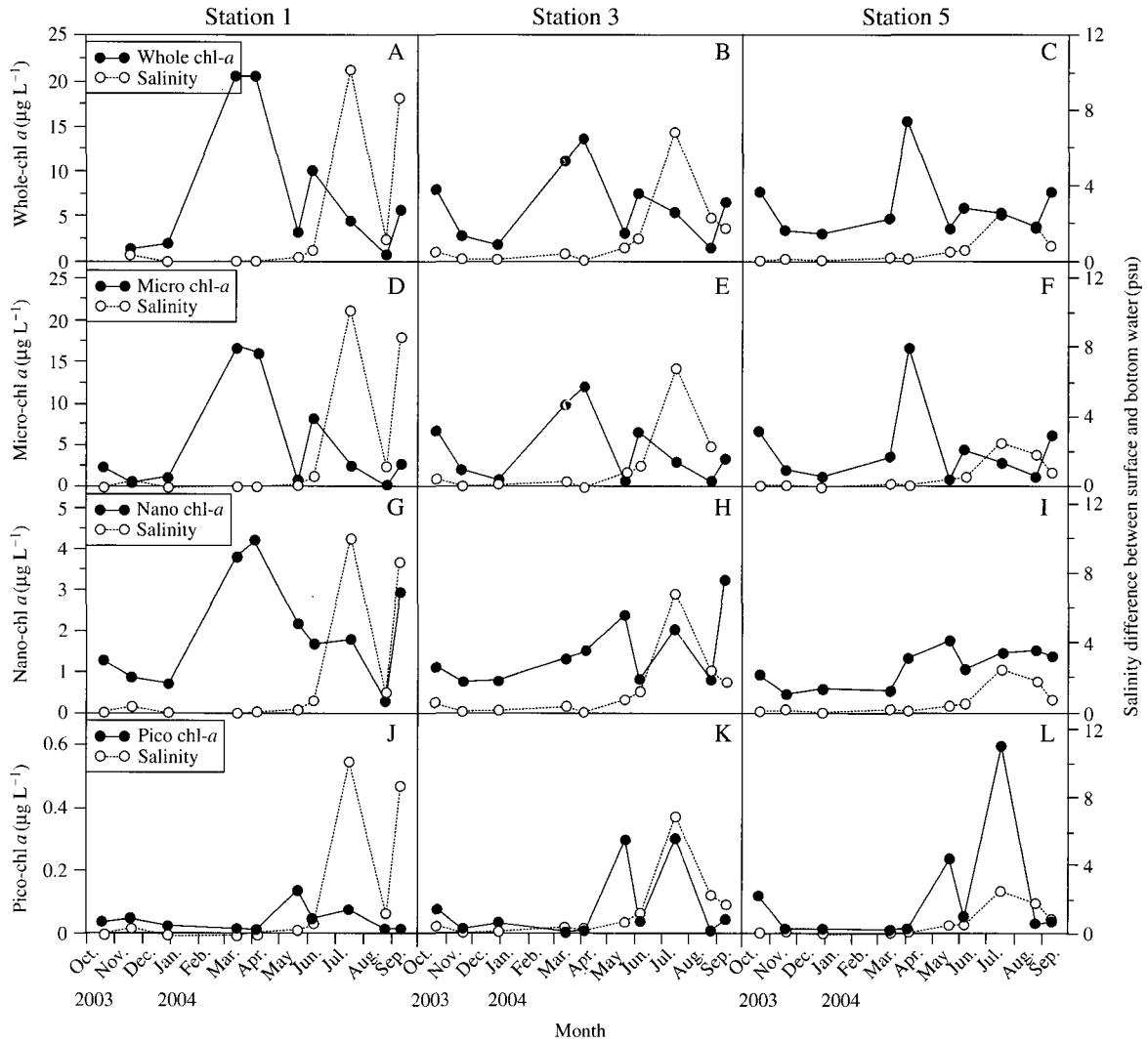


Fig. 4. Temporal variations of size fractionated of phytoplankton and salinity difference between surface and bottom water at three stations along the axis of the Asan Bay.

조사해역에서 봄에 대발생이 종결되는 5월 표층과 저층에서 낮은 용존 산소 분포를 나타내었다.

암모니아염은 모든 조사해역의 표층과 저층에서 2월과 3월 그리고 7월에 높은 농도 분포를 나타내었다(Fig. 5D-F). 공간적으로는 5월을 제외하고는 표층과 저층 모두 내측해역이 외측해역보다 높은 농도 분포를 보였으며, 특히 7월에 이러한 경향을 잘 보여주고 있다(Fig. 5D-F).

아질산염+질산염은 전반적으로 표층과 저층 모두 겨울과 여름에 각각 높은 농도 분포를 보였으며, 공간적으로는 표층과 저층 모두 내측해역인 정점 1에서 다소 높은 농도 분포를 나타내었다(Fig. 5G-I). 7월 정점 3에서는 표층과 저층에서 큰 농도 차이를 나타내었다.

인산염은 전반적으로 겨울에 다소 높다가 봄으로 갈수록 낮아지고 다시 강우가 집중되는 여름으로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 5J-L). 인산염도 아질산염+질산염처럼 7월과 8월에 정점 3에서는 표층과 저층에서 다소 농도 차이를 보였으며(Fig. 5K), 전반적으로 내측해역에서 높고 외측해역으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 5J-L).

규산염의 계절별 분포를 보면 9월에 예외적으로 정점 5의 저층에서 높은 농도 분포를 보인 것을 제외하고는 전반적으로 내측해역에서는 2월과 7월에 높은 농도를 보였으며(Fig. 5M), 외측해역으로 갈수록 최대값을 나타내는 시기가 4월과 8월로 늦추어지는 경향을 보였다(Fig. 5N, O). 공간적으로는 내측해역에서 높고 외측해역

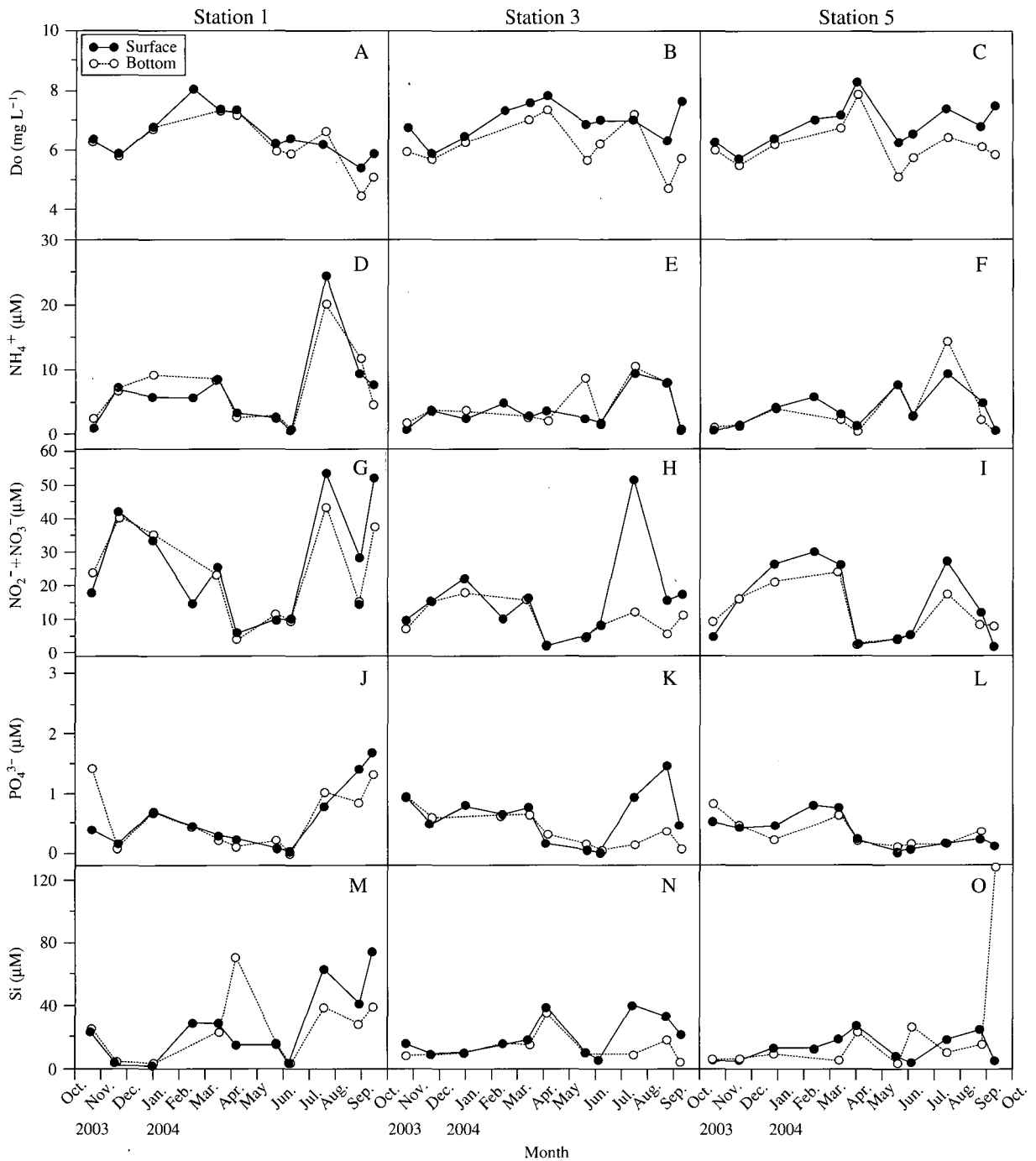


Fig. 5. Temporal variations of dissolved oxygen and inorganic nutrients at three stations along the axis of the Asan Bay.

으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다 (Fig. 5M-O).

3. 크기별 식물플랑크톤 분포

정점 1의 표층에서 전체식물플랑크톤 (whole-chlorophyll *a*)과 소형식물플랑크톤 생물량 (micro-chlorophyll

a) 분포를 보면 겨울과 봄 (2004년 2~4월) 동안 최대 생물량을 나타내었으며, 여름인 8월에 최소 생물량 분포를 보였다 (Fig. 6A, B). 미소식물플랑크톤 (nano-chlorophyll *a*)은 표층과 저층에서 각각 4월과 3월에 최대 생물량을 보였으며, 8월에 최소 생물량 분포를 나타내었다 (Fig. 6C). 초미세식물플랑크톤 (pico-chlorophyll *a*)은 표층과

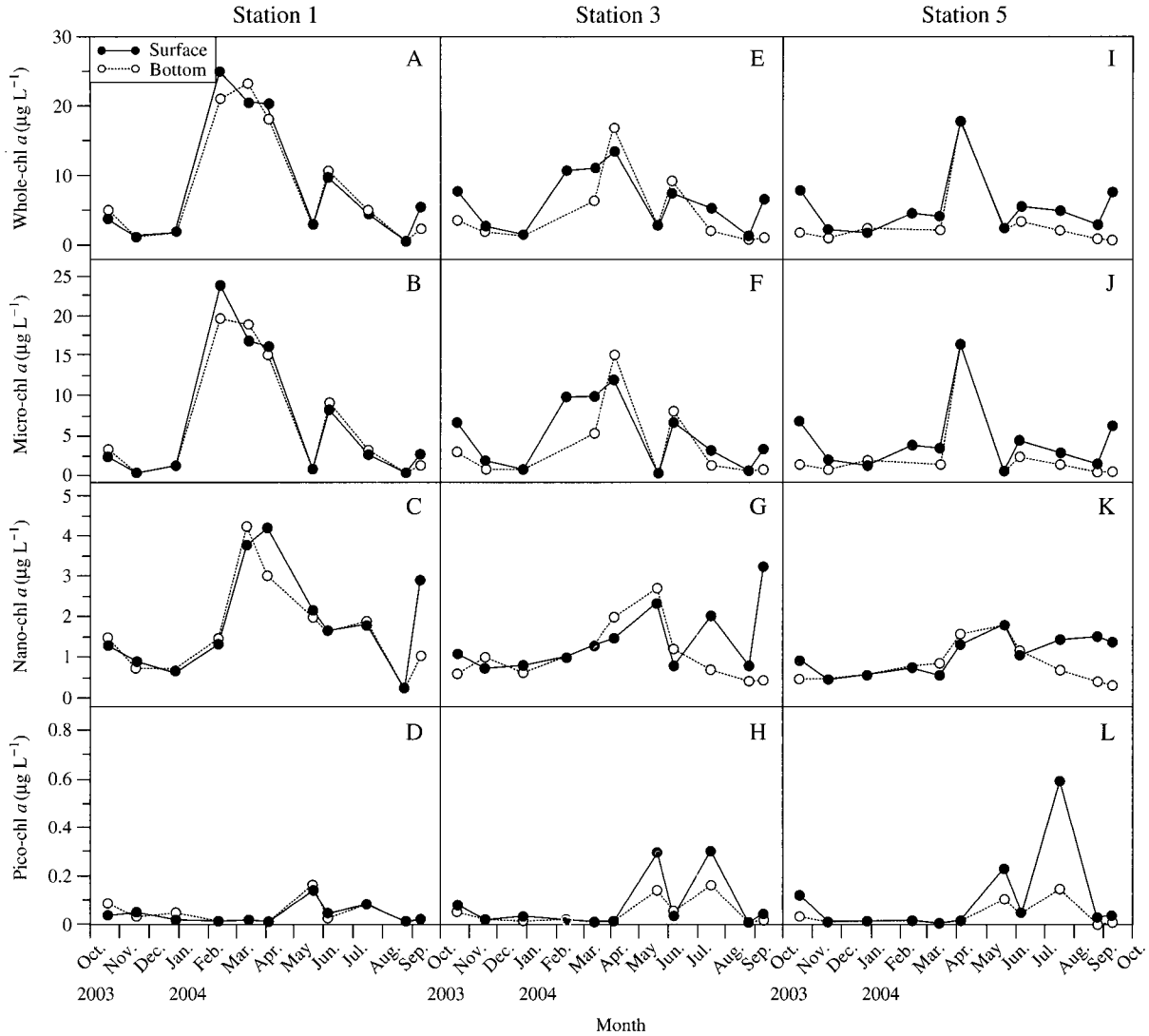


Fig. 6. Temporal variations of chlorophyll *a* in unfractionated water (whole-chl *a*), micro-sized chlorophyll *a* (micro-chl *a*), nano-sized chlorophyll *a* (nano-chl *a*), pico-sized chlorophyll *a* (pico-chl *a*) at 3 stations along the axis of the Asan bay.

저층에서 2003년 10월~2004년 4월까지 감소하다가 2004년 5월에 최대 생물량을 나타내었다 (Fig. 6D). 초미세식물플랑크톤을 제외한 다른 크기의 식물플랑크톤은 다른 조사 정점보다 높은 생물량 분포를 나타내었으며 세포의 크기가 작을수록 따뜻한 시기에 최대 생물량 분포를 보였다 (Fig. 6A-D).

2월에 전체식물플랑크톤이 최대 생물량 보였던 정점 1과는 달리 정점 3에서는 표층과 저층에서 4월에 최대, 8월에 최소 생물량을 나타내었으며, 전반적으로 정점 1에 비해 낮은 생물량 분포를 보였다 (Fig. 6E). 소형식물플랑크톤은 전체식물플랑크톤과 상당히 유사한 분포를 나타내었고 (Fig. 6F), 미소식물플랑크톤은 표층과 저층에서 9월과 5월에 각각 최대 생물량을 나타내었다 (Fig.

6G). 초미세식물플랑크톤은 표층에서 5월과 7월에 각각 높은 생물량 분포를 보였다 (Fig. 6H).

외측해역인 정점 5에서 전체식물플랑크톤과 소형식물플랑크톤은 표층과 저층에서 4월에 최대 생물량을 나타내었으며 (Fig. 6I, J), 미소식물플랑크톤은 5월 (Fig. 6K), 초미세식물플랑크톤은 7월 표층에서 최대 생물량 분포를 보였다 (Fig. 6L).

대발생이 일어났던 겨울과 봄 (2004년 2~3월)의 표층과 저층에서 전체와 소형식물플랑크톤의 공간적 분포를 보면 내측해역에서 높고 외측해역으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 6A, B, E, F, I, J). 미소식물플랑크톤은 2004년 4월에 가장 내측해역인 정점 1의 표층에서 최대 생물량을 보였으며 (Fig. 6C), 전반적으로 표층과 저층 모

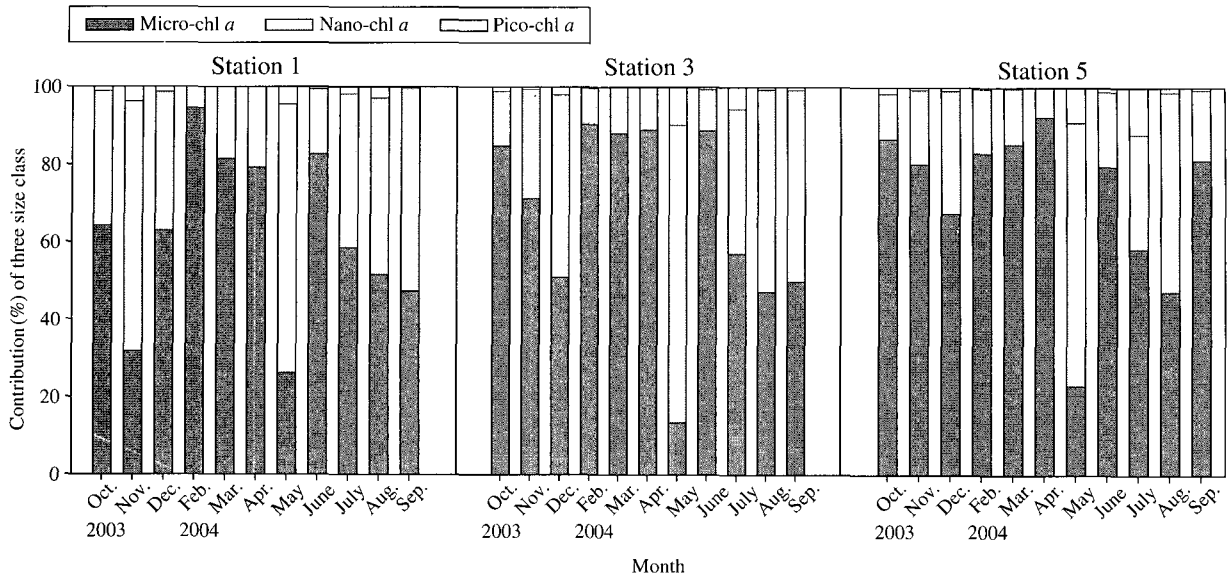


Fig. 7. Percentage contributions (%) of three size class (micro-, nano- and pico-sized) to the total chlorophyll *a* in the surface water of the Asan Bay.

두 내측해역에서 높고 외측해역으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 6C, G, K). 초미세식물플랑크톤은 다른 크기의 식물플랑크톤과는 다르게 내측해역보다 외측해역에서 높은 생물량 분포를 나타내었다 (Fig. 6D, H, L).

전체식물플랑크톤에 대하여 크기에 따른 엽록소 *a* 량의 분포를 보면 모든 조사해역의 표층에서 대발생이 발생한 2004년 2~4월 동안 소형식물플랑크톤은 전체식물플랑크톤에 대하여 상당히 높은 비율을 차지하였으며 특히 2004년 2월에 정점 1에서 94.6%로 매우 높았다 (Fig. 7A). 모든 조사해역에서 우점 하였던 소형식물플랑크톤은 대발생이 종결되는 시기인 2004년 5월에 표층에서 미소식물플랑크톤으로 크기 구조의 변화가 발생하였으며 (Fig. 7A-C), 특히 정점3에서는 약 76%의 분포를 보이면서 다른 지역보다 높은 점유율을 나타내었다 (Fig. 7B). 미소와 초미세식물플랑크톤은 소형식물플랑크톤과는 반대로 따뜻한 계절인 5월과 7월에 모든 조사해역의 표층에서 높은 분포를 나타내었고, 전반적으로 내측해역보다 외측해역에서 높은 분포를 보였다 (Fig. 7B, C).

4. 식물플랑크톤과 환경인자와의 상관성

본 연구의 조사 정점에서 크기별 식물플랑크톤과 환경인자들과의 상관성을 Table 1에 나타내었다. 전체 식물플랑크톤과 환경인자와의 상관성을 보면 내측해역인 정점 1에서 수온과는 유의한 음의 상관성을 보여주고 있으며 광 소산계수인 K_d 와 용존산소와는 양의 상관성

을 나타내었다. 일조시간과는 정점 1, 3, 5에서 유의한 양의 상관성을 보여주었다. 영양염류와 전체식물플랑크톤과의 상관성을 보면 아질산염+질산염은 정점 1과 5에서 음의 상관성을 나타내었다.

전체식물플랑크톤에 대해서 소형식물플랑크톤은 높은 분포를 보이므로 소형식물플랑크톤과 환경인자의 상관성은 전체식물플랑크톤의 상관성과 비슷한 경향을 나타내었다. 소형식물플랑크톤과 수온과의 상관성을 보면 정점 1에서 유의한 음의 상관성을 나타내었으며, 일조시간과도 정점 1, 3, 5에서 두드러진 양의 상관성을 보였다. 광 소산계수인 K_d 와는 내측해역인 정점 1에서 유의한 양의 상관성을 나타내었다. 아질산염+질산염은 정점 1, 5에서 음의 상관성을 보였으며, 암모니아염과는 정점 5에서 음의 상관성을, DO와는 전 조사 지점에서 매우 유의한 양의 상관성을 나타내었다.

미소와 초미세식물플랑크톤은 전체 및 소형식물플랑크톤과는 반대로 외측해역에서 환경인자와의 상관성이 나타났다. 미소플랑크톤은 외측해역인 정점 5에서 수온 및 강수량과 유의한 양의 상관성을 보였으며 염분과 영양염인 아질산염+질산염, 인산염과는 유의한 음의 상관성을 나타내었다. 초미세플랑크톤과 환경인자의 상관성을 살펴보면, 내측해역인 정점 1에서 규산염과 음의 상관성을 보인 것을 제외하고는 별다른 상관성을 보이지 않았으나 외측해역에서는 여러 가지 환경인자들과 상관성을 나타내었다. 정점 3, 5에서는 염분과 음의 상관성을 보였으며, 강수량과는 유의한 양의 상관성을 보였다. 정

Table 1. Results (r^2) of linear regression analyses of surface whole-, micro-, nano- and pico-chlorophyll a ($\mu\text{g L}^{-1}$) vs. environmental factors during the sampling periods. r^2 values less than 0.2 were omitted and denoted by '-'. Negative value denote negative relationship.

	Station	Sal.	Temp.	K_d	Rad	Pre.	DO	NH_4^+	$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$	PO_4^{3-}	Si	N:P
Wholesize class	St. 1		-0.39 ^b	0.38 ^b	0.31 ^a		0.79 ^b		-0.22			
	St. 2		-0.38 ^b	0.61 ^b	0.27		0.63 ^b					
	St. 3				0.44 ^b		0.67 ^b					
	St. 4						0.83 ^b				0.59 ^b	
	St. 5				0.28 ^a		0.55 ^b		-0.25			
Microsize class	St. 1		-0.42 ^b	0.36 ^b	0.28 ^a		0.81 ^b		-0.22			
	St. 2		-0.42 ^b	0.59 ^b	0.26		0.62 ^b					
	St. 3		-0.25		0.44 ^b		0.50 ^b					
	St. 4						0.80 ^b				0.57 ^b	
	St. 5				0.30 ^a		0.50 ^b	-0.27	-0.21			
Nanosize class	St. 1				0.24				-0.24			
	St. 2											
	St. 3						0.29 ^a					
	St. 4	-0.31 ^a	0.33 ^a			0.47 ^b			-0.54 ^b	-0.43 ^b		
	St. 5	-0.25	0.28 ^a			0.44 ^b			-0.28 ^a	-0.65 ^b		
Picosize class	St. 1										-0.27	
	St. 2											
	St. 3	-0.28 ^a				0.26				0.22		
	St. 4	-0.53 ^b		0.54 ^b	-0.25	0.52 ^b			0.48 ^b	0.42 ^b	-0.11 ^b	
	St. 5	-0.31 ^a				0.46 ^b			0.50 ^b	-0.31		

^a $P < 0.1$, ^b $P < 0.05$, *Salinity (Sal., psu), Temperature (Temp. °C), Light attenuation coefficient (K_d , m^{-1}), Photo-period (Rad, hr), Precipitation (Pre., mm), Dissolved Oxygen (DO, mg L^{-1}), Ammonia (NH_4^+ , μM), Nitrite+Nitrate ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, μM), Phosphate (PO_4^{3-} , μM), Silicate (Si, μM), N:P molar ratio (N:P).

Table 2. Results (r^2) of linear regression analyses of dike discharge vs. chlorophyll a and environmental factors during the sampling periods. r^2 values less than 0.2 were omitted and denoted by '-'. Negative value denote negative relationship

Station	Whole	Micro	Nano	Pico	Sal.	K_d	NH_4^+	$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$	PO_4^{3-}	Si
Station 1					-0.89 ^b		0.58 ^b	0.38 ^b	0.21	0.48 ^b
Station 2					-0.92 ^b		0.37 ^b	0.36	0.33 ^a	0.50 ^b
Station 3				0.28 ^b	-0.94 ^b		0.25	0.60 ^b		
Station 4			0.30 ^a	0.64 ^b	-0.89 ^b	0.23	0.28 ^a	0.20	-0.31 ^a	
Station 5			0.25	0.53 ^b	-0.84 ^b		0.21		-0.31 ^a	

^a $P < 0.1$, ^b $P < 0.05$, Whole-chlorophyll a (Whole, $\mu\text{g L}^{-1}$), Micro-chlorophyll a (Micro, $\mu\text{g L}^{-1}$), Nano-chlorophyll a (Nano, $\mu\text{g L}^{-1}$), Pico-chlorophyll a (Pico, $\mu\text{g L}^{-1}$), Salinity (Sal., psu), Light attenuation coefficient (K_d , m^{-1}), Ammonia (NH_4^+ , μM), Nitrite+Nitrate ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, μM), Phosphate (PO_4^{3-} , μM), Silicate (Si, μM), N:P molar ratio (N:P).

점 5에서 아질산염+질산염과의 두드러진 양의 상관성은 초미세식물플랑크톤이 아질산염+질산염에 대한 선호도가 높음을 간접적으로 나타내어준다고 사료된다. 인산염과는 정점 3에서는 양의 상관성을 보였으나 정점 5에서는 음의 상관성을 보였다.

하구언으로부터 담수의 유입에 따른 영향을 조사하기 위해 하구언의 담수 배출량(월 합)과 크기별 식물플랑크톤 및 환경인자와의 상관성을 살펴보았다(Table 2). 조사 기간 동안 하구언 배출량과 전체 및 소형식물플랑크톤은 상관성을 나타내지 않았으며, 미소와 초미세식물플랑크톤은 외측해역에서 양의 상관성을 나타내었다. 염분과는 모든 조사해역에서 음의 상관성을 나타내어서 만내 담수 유입에 따라 염분의 변화가 나타나는 것을 알 수 있었다. 하구언 배출수와 영양염과의 상관성을 보면

아질산염+질산염, 암모니아염과는 거의 모든 조사해역에서 양의 상관성을 규산염과는 내측해역에서 양의 상관성을 나타내었다. 이와 같은 결과는 하구언 배출수가 영양염의 공급원임을 간접적으로 나타내 준다.

고 찰

일반적으로 연안 하구 환경은 하구언으로부터 유입되는 많은 양의 담수가 식물플랑크톤의 성장과 사멸에 영향을 미치는 여러 가지 환경인자들을 일시적으로 변화시킨다(Cloern *et al.* 1983; Malone *et al.* 1988; Boyer *et al.* 1993). 신 등(2005)도 방조제 수문 개방시 일시적으로 많은 양의 담수가 유입되어 만내 낮은 염분, 탁도 및 영

양염 농도의 증가 등 많은 환경적 변화를 일으킨다고 보고하였다. 본 연구에서도 하구연 방류수의 만내 유입에 따른 표층의 낮은 염분과 영양염 농도 증가등과 같은 환경인자들의 변화를 확인할 수 있었다 (Fig. 3A-C, Fig. 5D-O).

식물플랑크톤 대발생이 일어난 겨울과 봄에 소형식물플랑크톤은 전체식물플랑크톤과 시공간적으로 아주 유사한 분포를 보였으며, 전체식물플랑크톤에 대해서도 90% 이상 높은 분포를 나타내어 (Fig. 7), 겨울과 봄에 식물플랑크톤의 대발생은 소형식물플랑크톤에 의하여 발생하였음을 알 수 있다. 이는 양 등 (2003)이 아산만과 인접한 경기만에서 전체식물플랑크톤의 대발생은 3월에 형성되며, 이때 소형식물플랑크톤이 높은 분포를 보인다는 결과와 일치한다. 소형식물플랑크톤에 의한 봄철 대발생은 저층 수온이 10°C에서 16°C로 증가할 때 종결된다는 연구 결과 (Malone 1992)와 같이 저층 수온이 12°C에서 15°C의 분포를 보이는 5월에 소형식물플랑크톤에서 미소식물플랑크톤으로의 크기 구조의 변동과 함께 봄철 대발생은 종결됨을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다 (Fig. 7A-C). 대발생이 일어난 기간 동안 영양염은 내측과 외측해역에서 큰 농도 차이를 나타내지 않았다 (Fig. 5D-O). 이는 방조제로부터 유입되는 담수를 통해 공급된 영양염이 내측해역에서 활발한 성장을 보이는 식물플랑크톤에 의해 이용되었기 때문인 것으로 판단된다. 권 등 (2004)의 연구 결과에서도 식물플랑크톤 대발생이 일어나는 갈수기인 가을부터 봄까지 섬진강 저염분역에서는 식물플랑크톤이 성장을 하기 위해 활발한 영양염 이용으로 인해 영양염이 제거 되어진다고 보고하였다. 결국 소형식물플랑크톤은 크기가 작은 미소식물플랑크톤에 비해 상대적으로 낮은 수온을 선호한다는 보고 (Goldman and Ryther 1976; Malone and Neale 1981)와 대발생이 일어난 겨울에 아산만에서는 *Skeletonema costatum*과 *Thalassiosira* spp. 등의 규조류가 우세하며 이러한 종들은 낮은 수온과 높은 영양염을 선호한다는 이 등 (2005)의 연구 결과 그리고 본 연구에서 수온과 크기별 생물량과의 상관성 조사 결과 (Table 1)를 고려하면 영양염과 수온이 겨울과 봄에 나타나는 소형식물플랑크톤의 생물량 변동에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

대발생이 종결되어지는 5월 미소식물플랑크톤은 모든 정점에서 전체 식물플랑크톤의 생물량에 약 65% 이상의 분포를 보이며 우점 하였으며 (Fig. 7A-C), 특히 정점 3에서는 약 76.7%를 차지하면서 우점 하였다 (Fig. 7B). 이러한 미소식물플랑크톤이 분포는 봄에 대발생후 미소와 초미세식물플랑크톤은 전체 식물플랑크톤에 대하여

80%가 넘는 분포를 나타낸다는 보고와 일치한다 (McCarthy *et al.* 1974). 이러한 미소식물플랑크톤의 분포 증가는 미소식물플랑크톤의 생물량 증가보다는 소형식물플랑크톤의 생물량이 2월에 4.6~25.12 $\mu\text{g L}^{-1}$ 범위에서 5월에 0.83~0.1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 범위로 감소하여 상대적으로 미소식물플랑크톤의 분포가 높게 나타났기 때문이다. 이러한 분포의 변화에 따라 2월에 우점하였던 규조류 *Skeletonema costatum*과 *Thalassiosira* spp.는 5월로 가면서 감소하여 5월에는 *Rhizosolenia* spp.와 *Pseudo-nitzschia* spp.가 우점종으로 출현하였다 (이 등 2005). 표층과 저층의 염분과 미소식물플랑크톤 생물량 차이의 관계를 보면 정점 1에서는 별다른 상관성을 나타내지 않았으나 정점 3과 5에서는 염분 차이가 증가할수록 미소식물플랑크톤의 생물량이 증가하는 경향을 나타냈다 (Fig. 4G-I). 따라서 봄에 미소식물플랑크톤은 소형식물플랑크톤의 생물량 감소에 따른 영양염의 공급에 의해서 영향을 받는 것으로 사료되며, 여름에는 하구연 방조제로부터 유입되는 담수에 의한 성층과 유속 (flushing rate)에 의해서 영향을 받을 것으로 사료된다.

초미세식물플랑크톤은 담수의 영향을 받는 연안 하구에서 일반적으로 따뜻한 수온과 충분한 빛이 존재하는 계절에 높은 성장률을 보이며 (Loftus *et al.* 1972; Malone 1977), 공간적으로는 연안과 떨어진 해역에서 높은 생물량 분포를 나타낸다 (Strickland *et al.* 1969; Beers *et al.* 1971). 본 연구에서도 초미세식물플랑크톤은 계절적으로 낮은 봄과 여름인 5월과 7월에 모든 조사해역에서 높은 생물량 분포를 보였으며, 공간적으로는 소형 및 미소식물플랑크톤과는 반대로 영양염 농도가 낮은 외측해역에서 높은 생물량을 분포를 나타내었다 (Fig. 6D, H, L). 이는 초미세식물플랑크톤이 소형식물플랑크톤보다 더 큰 비표면적을 갖고 있어서 더 오랜 시간 부유할 수 있고 더 효율적으로 영양염과 빛을 이용할 수 있기 때문 (Thurman and Trujillo 1999)인 것으로 사료된다. Fig. 6에 나타나듯 전체와 소형식물플랑크톤 생물량이 급격히 감소하거나 낮은 분포를 보일 때 초미세식물플랑크톤이 높은 생물량 분포를 나타내는 결과는 초미세식물플랑크톤이 소형식물플랑크톤과는 다른 환경적 특성에 의해 영향을 받는다는 것을 암시한다. Chisholm (1992)도 전체식물플랑크톤의 생물량이 감소할 때 초미세식물플랑크톤의 생물량은 증가한다고 하였다. 초미세식물플랑크톤의 5월에 높은 생물량 분포는 소형식물플랑크톤에 의한 대발생이 종결됨에 따라서 상대적으로 많은 양의 영양염이 초미세식물플랑크톤에게 공급되었기 때문이라 여겨지며, 7월의 높은 생물량 분포 (특히 외측해역에서)는 여름의 짧은 일조시간 (Fig. 2A)과 수온 상승에 따른

성층현상을 고려했을 때 비표면적이 큰 초미세식물플랑크톤이 상대적으로 더 긴 시간동안 유광층에서 부유할 수 있었기 때문이라 판단된다. 하지만 초미세식물플랑크톤의 생물량 변동에 대한 좀 더 정확한 기작을 이해하기 위해서는 필터의 소재에 따른 초미세 식물플랑크톤의 여과율 변화, 생리적 특성을 고려한 심도 있는 연구가 필요하다고 판단된다.

결론적으로 소형식물플랑크톤은 내측해역에서는 2월, 외측해역에서는 4월에 높은 생물량 분포를 보였으며 조사 기간 동안 표층과 저층에서는 비슷한 생물량 분포를 보이는 것으로 보아서 수층보다는 시간(월)과 공간(정점)에 따라 변하는 특성을 나타내었다. 초미세식물플랑크톤은 5월과 7월 내측보다는 외측해역에서 높은 생물량 분포를 보였으며 표층과 저층에서 생물량 차이가 나타나는 것으로 보아서 시간과 공간 그리고 수층에 따라 변하는 특성을 나타내었다. 하지만 소형식물플랑크톤과는 다른 계절적 그리고 공간적 특성을 나타내었다. 겨울과 봄에 미소식물플랑크톤은 소형식물플랑크톤과 비슷한 분포 경향을 보였고 여름에는 초미세식물플랑크톤과 비슷한 분포 경향을 보였다. 따라서 아산만에서 크기별 식물플랑크톤은 계절, 공간, 수층에 따라서 다른 분포 경향을 나타내는 것으로 나타났다. 이러한 크기별 식물플랑크톤이 서로 다른 분포 특성은 영향을 주는 환경인자들이 다를 것이라는 것을 간접적으로 암시해 주며 본 연구 결과에서도 선호하는 환경인자들이 서로 다른 것으로 나타났다. 본 연구는 1년 동안 매월 현장조사를 실시하였기에 수층 생태계 차원의 거시적 관점에서 얻어진 결과라 할 수 있고 추가적으로 조석에 따른 시간별 현장조사도 필요할 것으로 사료된다. 하지만 현재까지 아산만에서 크기구조에 따른 식물플랑크톤이 분포에 관한 연구가 보고가 적다는 점을 고려할 때 본 연구 결과는 아산만 식물플랑크톤의 동력학에 대한 이해와 효율적인 수질관리 대책 마련을 위한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

적 요

아산만에서 크기별 식물플랑크톤의 계절적인 변동과 크기 구조에 따른 식물플랑크톤과 환경인자와의 상관성을 조사하기 위해 2003년 10월부터 2004년 9월까지 매월 5개의 조사 정점에서 현장조사를 실시하였다. 조사 기간 동안 전체 엽록소 *a* 농도에 대해서 크기가 큰 세포들(소형 식물플랑크톤, > 20 μm)은 크기가 작은 세포들(미소식물플랑크톤, 3~20 μm ; 초미세 식물플랑크톤, < 3

μm)보다 더 높은 점유율을 나타내었다. 특히 엽록소 *a* 농도가 높았던 2004년 2월부터 4월까지 크기가 큰 세포들은 전체 엽록소 *a* 대하여 80% 이상 점유율을 보였다. 식물플랑크톤 생체량이 감소했던 5월 소형식물플랑크톤에서 미소식물플랑크톤으로 크기 구조의 변동이 일어났으며, 초미세 식물플랑크톤의 생체량도 급격히 증가하였다. 겨울과 봄철동안 소형식물플랑크톤은 상류지역에서 높은 생체량 분포를 보였으며, 미소와 초미세 식물플랑크톤은 봄과 여름철 중류와 하류(정점 3, 5)에서 높은 생체량 분포를 나타내었다. 소형식물플랑크톤은 추운 계절 동안 수온과 영양염의 공급에 의해서 조절되어지는 반면에 미소와 초미세 식물플랑크톤은 따뜻한 계절 동안 성층과 빛에 노출 등에 의해서 영향을 받는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2003-000-10080-0) 지원으로 수행되었습니다. 본 논문 완성을 위해 많은 도움을 주신 심사위원님들과 현장조사와 실험에 도움을 준 목포해양대학교 해양환경미생물 실험실원들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 권기영, 문창호, 이재성, 양성렬, 박미옥, 이필용. 2004. 섬진강 하구역에서 영양염의 하구내 거동과 플럭스. 한국해양학회지(바다), 9:153-163.
- 문창호, 박철, 이승용. 1993. 아산만의 영양염 및 입자성 유기물. 한국수산학회지, 26:173-181.
- 신용식, 서호영, 현봉길. 2005. 해수층의 염분 변화가 일차생산자와 상위소비자의 크기구조에 미치는 영향. 한국해양학회지, 10:113-123.
- 이상현, 신용식, 양성렬, 박철. 2005. 아산만 식물플랑크톤의 계절별 군집분포 특성. Ocean Polar Res. 27:149-159.
- 이태원. 1991. 아산만 저어류 I. 적정 채집 방법. 한국수산학회지, 26:424-437.
- 양은진, 최종기. 2003. 경기만 수역에서 미세생물 군집의 계절적 변동 연구 II. 미소형 및 소형 동물플랑크톤. 한국해양학회지, 8:78-93.
- Beers JR and GL Stewart. 1971. Microzooplankters in the plankton communities of the upper waters of the eastern tropical Pacific. Deep Sea Res. 18:861-883.
- Boyer JP, RR Christian and DW Stanley. 1993. Patterns phytoplankton primary productivity in the Neuse River

- estuary, North Carolina, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 97: 287-297.
- Boynton WR, WM Kemp and CW Keef. 1982. A comparative analysis of nutrient and other factors influencing estuarine phytoplankton, pp.69-90. In: V. Kennedy (ed), *Estuarine Comparisons*. Academic Press, New York.
- Chisholm SW. 1992. Phytoplankton size. In Falkowski, P.G. and Woodhead, A. D. (eds), *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*. Plenum Press, New York, pp. 213-237.
- Cloern JE, AE Alpine, BE Cole, RLJ Wong, JF Arthur and MD Ball. 1983. River discharge controls phytoplankton dynamics in the northern San Francisco Bay estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 16:415-429.
- Goldman JC and JH Ryther. 1976. Temperature-influenced species competition in mass cultures of marine phytoplankton. *Biotechnol. Bioeng.* 18:1125-1144.
- Harper, D. 1992. *Eutrophication of freshwater. Principles, problems and restoration*. Chapman and Hall, London. p. 329.
- Hein M, MF Pedersen and K Sand-Jensen. 1995. Size-dependent nitrogen uptake in micro- and macroalgae. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 118:247-253.
- Kemp WM and WR Boynton. 1981. External and internal factors regulating metabolic roles of an estuaries benthic community. *Oecologia* 51:19-27.
- Krik JTO. 1994. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. P. 75-77. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Loftus ME, DV Subba Rao and HH Seliger. 1972. Growth and dissipation of phytoplankton in Chesapeake Bay. I. Response to a large pulse of rainfall. *Chesapeake Sci.* 13:282-99.
- Malone TC. 1992. Effects of water column processes on dissolved oxygen, nutrients, phytoplankton, and zooplankton, pp.61-112. In D.E. Smith, M. Leffler, and G. Mackiernan (eds.), *Oxygen Dynamics in the Chesapeake Bay: A Synthesis of Research*. Maryland Sea Grant College, College Park, Maryland.
- Malone TC, LH Crocker, SE Pike and BW Wendler. 1988. Influences of river flow on the dynamics of phytoplankton production in a partially stratified estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 48:235-249.
- Malone TC and PJ Neale. 1981. Parameters of light-dependent photosynthesis for phytoplankton size fractions in temperate estuarine and coastal environments. *Mar. Bio.* 61: 289-297.
- Malone TC and Chervin MB. 1979. The production and fate of phytoplankton size fractions in the plume of Hudson River, New York Bight. *Limnol. Oceanogr.* 24:683-696.
- Malone TC. 1977. Light-saturated photosynthesis by phytoplankton size fractions in the New York Bight. *USA, Mar. Biol.* 42:281-292.
- McCarthy JJ, WR Taylor and ME Loftus. 1974. Significance of nanoplankton in the Chesapeake Bay estuary and problems associated with the measurement of nanoplankton productivity. *Mar. Biol.* 24:7-16.
- Park C, KH Choi and CH Moon. 1991. Distribution of zooplankton in Asan Bay, Korea with Comments on Vertical Migration. *Bull. Korean Fish. Soc.* 24:472-482.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press. 173pp.
- Sin YS and J Kim. 2003. Relative importance of Bottom-up vs. Top-down Controls on Size-structured Phytoplankton Dynamics in a Freshwater Ecosystem: I. Temporal and Spatial Variations of Size Structure. *Korean J. Limnol.* 36 :403-412.
- Strickland JDH, RW Eppley and BR De Mendiola. 1969. Phytoplankton populations, nutrients and photosynthesis in Peruvian coastal waters. *Inst. Mar. Preu (Callav) Bol.* 2:4-45.
- Sundback K, B Joensseon, P Nilsson and I Lindstroem. 1990. Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: An experimental study. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 58:261-274.
- Thurman HV and AP Trujillo. 1999. *Essentials of Oceanography*. Prentice-Hall, Inc. pp. 374-375.

Manuscript Received: April 20, 2005

Revision Accepted: September 14, 2005

Responsible Editorial Member: Ho Young Soh
(Yosu Univ.)