2011-2012년 낙동강 하구 및 연안역에서 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 변화

정미희* · 윤석현

국립수산과학원 수산해양종합정보과

Temporal and Spatial Variability of Phytoplankton Communities in the Nakdong River Estuary and Coastal Area, 2011-2012

MI HEE CHUNG* AND SEOK-HYUN YOUN

Fishery & Ocean Information Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea

상류지역의 보 건설과 준설작업이 이루어지고 있던 2011년 1월부터 2012년 10월까지 낙동강, 하구 및 연안역에 걸쳐 식물플랑크톤 군집의 변화양상을 이해하고자 14개 정점에서 총 12회의 조사를 실시하였다. 조사시기동안 낙동강 유역의 월 누적 강수량은 0~502mm 이었다. 강유역은 표·저층 모두에서 해수의 영향이 없었고, 하구역 정점에서는 0.1~34.8 psu의 범위로 강우의 영향으로 염분 변동폭이 컸으며, 연안역에서는 홍수기인 7-8월을 제외하고는 대부분 정점에서 30 psu이상의 염분 특성을 보였다. 식물플랑크톤은 총 402종이 분류 동정되었으며 강유역에서는 178종, 하구 및 연안역에서는 331종이 출현하였다. 식물플랑크톤 현존량은 강유역, 하구역, 연안역 순으로 감소하였으며, 2011년에 비해 2012년에 높게 나타났다. 출현빈도와 우점종 측면에서 전체 조사 수역의 상위 20종은 *Stephanodiscus* spp., *Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira* var. *angustissima*, *Pseudo-nitzschia* spp.의 순이었으며, 중요 분류군은 규조류인 것으로 나타났다. 계절별 각각의 정점에서 가장 우점비율이 높았던 종은 2011년(13종)에 비해 2012년(10종)에 다소 단순화되는 경향을 보였다. 식물플랑크톤 종다양성지수는 조사 연도별로는 큰 차이가 없었으나, 강 및 하구에 비해 연안이 다소 높은 것으로 나타났다. 유사도에 의한 군집분석을 이용해 식물플랑크톤의 군집변화를 살펴보면 2011년은 조사시기에 따라 다양한 군집구조가 나타난 반면 2012년은 군집구조의 변화가 크지 않고 단순화 된 것으로 나타났다. 이와 같이 2011년에 비해 전반적으로 높아진 식물플랑크톤의 현존량, 단순화된 우점종의 수 및 군집 구조 등은 낙동강 유역의 급격한 환경변화로 인한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 다루지 못했던 낙동강-하구-연안의 영양염 분포, 담수유출 및 범위의 변화 등에 따른 식물플랑크톤을 포함한 생물군집의 통합적 분석이 함께 수행되어야 할 것으로 생각된다.

To understand the changing patterns in phytoplankton communities, we conducted 12 surveys along the Nakdong River, its estuary, and adjacent coastal areas between January 2011 and October 2012 (during the period of barrage construction and sediment dredging). Monthly precipitation ranged from 0 to 502 mm during the survey period, and salinity ranged between 0.1 psu and 0.3 psu in the Nakdong River, regardless of the depth, indicating no seawater influence, while salinity showed large seasonal fluctuations in the estuarine and coastal station, ranging from 0.1 psu to 34.8 psu. A total of 402 phytoplankton species were identified, 178 species from the river and 331 species from the estuary and coastal areas. Phytoplankton standing crop increased in 2012 compared to that in 2011, and was found to be highest in the river, followed by the estuary and coastal areas. Among the top 20 species in frequency of occurrence and dominance, *Stephanodiscus* spp., *Aulacoseira granulata*, and *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* and *Pseudo-nitzschia* spp. were important species along the river-estuary-coastal areas. Diatoms were the major taxonomic group inhabiting the Nakdong river-estuary-coastal areas. A comparison of seasonal dominant phytoplankton species revealed a slight decrease over the years, from 13 species in 2011 to 10 species in 2012. However, no significant difference was found in the diver-

sity of phytoplankton species between the two survey years, although lightly greater diversity was observed in the coastal areas than in the river and estuary. Cluster analysis with community composition data revealed that the community structure varied significantly in 2011 depending on the time of survey, while in 2012, it hardly showed any variation and was simpler. An increase in the phytoplankton standing crop, fewer dominant species, and simpler community structure in 2012 compared to those in 2011 are probably due to the rapid environmental changes along the Nakdong River. To investigate these ecological relationships, it is necessary to conduct further studies focusing on integrated analyses of biocenosis, including phytoplankton with respect to the changes in nutrient distribution, variation of freshwater discharge, and effect area of freshwater in the Nakdong estuary and adjacent coastal areas.

Key words: Nakdong river estuary, Phytoplankton community, Dominant species, Diversity index

서 론

하구역은 담수생태계와 해양생태계를 연결하는 전이지대로서 수생태계 중 가장 생산력이 높은 수역으로 알려져 있다. 하구생태계는 유역으로부터 수문학적 영향, 영양염류 및 기타 물질의 유입, 해양으로부터 염분의 영향을 동시에 받기 때문에 물리적·화학적 환경의 변화가 크며, 따라서 이 수역에 서식하는 생물들은 다양한 환경 변화에 따른 영향을 받게 된다(Kwon *et al.*, 2001). 또한 이러한 시·공간적인 환경 요인의 변화가 끊임없이 발생하는 하구역에 서식하는 생물들은 지속적인 생리, 생태학적 적응 기작을 요구받기 때문에 연안역이나 외양역에 비해 소수의 종에 의해 상대적으로 많은 생물량이 나타나는 생태학적 특징을 보인다(Nybakken, 1997).

그러나 인공적으로 방조제를 건설하여 개방수역을 폐쇄성 수역으로 전환할 경우 이러한 하구생태계의 고유한 특징은 없어지고 생태구조가 바뀌게 되어 하구 생태기능의 변화를 가져오게 된다(Chung *et al.*, 2004).

우리나라의 총 463개 하구 중 228개가 하구둑으로 차단되어 있으며(Lee *et al.*, 2011), 이 중 낙동강은 우리나라에서 두 번째로 긴 강으로 1987년에 하구둑이 완성되었다(Seo and Chung, 1994; Moon and Choi, 1991). 이후 2008년 하반기 정부 시책인 4대강 사업의 일환으로 낙동강 유역 내에 여러 개의 보가 설치되고 준설작업이 이루어졌으며, 2012년 사업이 완결되었다.

비록 낙동강 하구역은 시화호, 또는 화옹호와 같은 폐쇄성 간척호가 아니고, 주기적으로 담수가 해양으로 유입되고 있기는 하지만, 하구둑은 담수역과 해역의 자연스러운 물의 교환을 인위적으로 차단시킴으로써 생태계의 단절과 같은 고유의 하구기능을 손상시켜 오고 있다(Han *et al.*, 2011).

본 연구에서는 낙동강 유역과 하구, 그리고 연안에 이르는 수역에서 생태계 변화 연구의 일환으로 식물플랑크톤 군집 변화 연구를 수행하였다. 식물플랑크톤은 수중생태계의 일차생산자로서 종속영양생물들이 이용하는 유기물을 생산하며, 환경요인 변화에 매우 민감하게 반응하기 때문에 수 환경 변화 양상을 파악하기 위한 주요 요소 중의 하나이다(Chung *et al.*, 2004; Cloern *et al.*, 1983). 특히, 물리·화학적 변화가 큰 하구생태계에서는 환경의 특성, 해양과 담수역의 영향의 정도에 따라 해수와 담수생태계를 반영하는 특징적인 식물플랑크톤 군집이 존재하며, 수온, 염분, 영양염 등과 같은 요인들에 의해 군집 구조의 변화 및 우점종 천이 현상이 나타

난한다(Reynolds, 1983). 따라서 식물플랑크톤 군집구조 연구는 하구생태계의 생태학적 구조와 기능을 이해하기 위한 기본 항목이라 할 수 있다(Moon and Choi, 1991; Sin *et al.*, 2005).

낙동강 유역과 하구역의 식물플랑크톤 군집변화 연구는 1987년 하구둑이 완성된 이후 지속적으로 이루어졌으며(Moon and Choi, 1991; Seo and Chung, 1994), 하구역의 식물플랑크톤 생체량 및 수질 동향에 대한 연구(Sin *et al.*, 2005), 그리고 겨울철 구조류 수화현상에 대한 연구(Kim *et al.*, 2007)도 진행된 바 있다. 그러나 가장 최근 낙동강에 시행되었던 대대적인 보의 설치와 준설작업과 관련된 영향에 대한 연구는 아직 없었다. 하구둑 건설 이래로 가장 큰 환경변화가 예상되는 시점에서의 낙동강 유역 및 하구, 연안에 이르는 수역에서의 생태계 모니터링은 그 중요성이 크다. 본 연구에서는 낙동강 유역과 하구둑 하류에 해당하는 하구 및 연안 해역에서 식물플랑크톤 중요종 및 현존량을 파악하고, 종 조성 및 유사도를 이용한 군집분석을 통해 보 건설과 준설작업을 하던 시기의 식물플랑크톤 군집의 변화 양상을 이해하고자 하였다.

재료 및 방법

조사수역 개관 및 정점

낙동강 수계는 유역면적 23,717 km², 유로연장 521.5 km이다. 낙동강 하류 서부산에 위치한 낙동강 하구둑은 총연장 2,230 m로 총 10개의 하배수문과 2개의 어로가 수문부 양쪽에 설치되어 있으며, 하구둑의 주배수문은 좌안 및 우안배수문으로 구별되어 하구와 강을 분리하고 있다. 해수의 염분이 상류로 침투하는 것을 차단하기 위해 하구둑 상 하류 수위차가 0.2 m 이내일 때 하구둑 주배수문과 우안배수문을 폐쇄하며, 홍수기에만 최대방류를 위해 하구둑 전 수문을 완전 개방하고, 저수지 수위를 SMSL+1.0 m로 유지하고 있다. 낙동강 하구둑에서 상류수위와 하류 수위차 0.2 m를 기준으로 0.2 m 이상의 수위차가 생기는 경우에 방류를 시행하고 있다(Park *et al.*, 2008).

조사정점은 갈수기에 해당하는 2011년 1월 구포 부근 정점에서부터 하구 및 연안역까지 16개 정점(강유역 6정점, 하구역 및 연안역 10정점)의 예비실험을 통해 염분 0 psu의 강유역과 염분 0.5-25 psu의 하구역 그리고 염분 25 psu 이상의 연안역을 모두 포함할 수 있도록 총 14개의 정점을 선정하였다. 강 유역은 예비 조사시 모든 정점에서 염분 0 psu를 나타내고, 비슷한 식물플랑크톤 군집 유형을 보였기 때문에 하구둑과 가까운 정점으로 하구둑 바로 상

Fig. 1. Map of Nakdong river-estuary-coastal area (St. A~D: river zone; St. 1~3: estuary zone; St. 4~10: coastal zone).

류 정점을 포함하여 총 4개의 정점을 선택하였으며(St. A-D), 하구역 정점은 하구둑 바로 아래정점부터 총 3개(St. 1-3)를 선택하였다. 연안정점은 가덕도 서편 정점까지 포함시켜 총 7개(St. 4-10)로 정하였다(Fig. 1).

조사시기

조사는 2011년 1월부터 2012년 10월까지 총 12회에 걸쳐 진행되었다. 계절조사를 기본으로 하였으며, 2011년에는 갈수기에 해당하는 3월과 홍수기에 포함되는 7~9월 사이에 3회(7월, 1회; 8월, 중순경과 하순경, 2회)를 포함하여 총 8번의 조사가 실시되었으며, 2012년에는 계절조사 4회가 이루어졌다.

환경요인 측정

낙동강 유량에 영향을 미치는 기상요인인 강수량은 김해 또는 부산 기상청의 자료를 모두 사용할 수 있으나, 낙동강 하구둑 방류량은 평균적으로 김해의 기상자료보다 부산의 기상자료가 유의한 것으로 보고되었기 때문에(Yoon *et al.*, 2010), 본 연구에서는 부산 기상청 자료를 이용하였다. 이와 함께 조사시점에서 식물플랑크톤 분

포에 영향을 미칠 수 있는 방류량의 간접적 조사로 조사 10일전부터 강수량을 누적 계산하였다.

수온과 염분은 강 유역에서는 TS meter (Thermo scientific, Orion 3 star), 하구역과 연안역에서는 CTD (Seabird, 19*)를 이용하여 측정하였으며, 본 연구에서는 표층과 저층의 염분만 이용하였다.

식물플랑크톤 종조성 및 군집분석법

각 정점에서 식물플랑크톤 군집구조를 파악하기 위한 채집은 정성분석용 시료 채집과 정량분석용 채수로 나누어 이루어졌다. 정성분석을 위한 시료는 키타하라네트(망구: 30 cm, 망목: 20 μ m)를 이용하여 수직채집을 하였다. 정량분석을 위한 시료는 표층과 저층으로 수층을 나누어 각각 니스킨 샘플러를 이용하여 1 L를 채수하였으며, 정성분석용 시료와 함께 루골 용액으로 고정하였다(UNESCO, 1978).

실험실로 옮겨진 고정된 정량 시료는 현존량 분석을 위해 실험실에서 3~4일간 정체시켜 최종농도 20 ml로 농축한 후 Sedwick-Rafter Chamber를 이용하여 200~400배의 광학현미경(Olympus BX40) 하에서 계수하였다.

각 수역의 군집 구조 파악을 위해 총 현존량(밀도)에서 가장 높은 비율로 출현한 종을 최우점종으로 분류하였으며, 전체 수역 및 담수역, 해수역으로 나누어 각 수역을 대표하는 종을 파악하고자 현존량을 기준으로 출현 빈도를 계수하여 상위 20위의 종을 중요종으로 선정하였다.

조사시기별 종 다양성 분석을 위해 Shannon & Weaver 방법으로 다양성지수(H')를 구하고, 군집 분석은 UPGMA (Unweighted Pair Group Method using Arithmetic algorithm, 비가중산술결합)을 이용하여 Percent similarity 방법으로 식물플랑크톤의 출현 및 출현량을 함께 고려하여 분석하였다(MVSP, 3.1).

식물플랑크톤 중 규조류의 분류는 Round *et al.*(1990)의 체계를 따랐으며, 이후 이명 정리는 Tomas(1997)를 따라 정리하였다. 식물플랑크톤의 분류 및 동정은 Isamu(1982), Shim(1994), Tomas(1997), 정(1993), Mizuno(1964)를 참고하였으며, 규조류를 제외한 식물플랑크톤의 분류체계는 Algaebase(www.algaebase.org)를 참고하였다.

결 과

강수량 및 염분

부산 기상청 자료에 따르면 2011년 1월부터 2012년 10월까지의 조사시기 동안 낙동강 유역의 월 강수량은 0~502 mm로 나타났다. 2012년 7월에 가장 많은 강우가 있었으며, 2011년 1월에는 강우 또는 강설이 없었던 것으로 나타났다. 일일 강수량을 살펴보면 2011년과 2012년 7월 각각 245 mm와 231 mm의 최대 강수량을 나타내었다. 조사 전 10일간 누적강수량은 0~147.5 mm로서 2011년 7월에 가장 많은 강우량이 조사되었으며 8월 중순 조사에서 51.2 mm인 것으로 나타났다. 강우량이 가장 많았던 2012년 7월에는 10일 누적 강수량이 12.1 mm로 나타났다(Fig. 2, Table 1).

표층 염분은 강우역의 전 정점에서 0.2 psu 이하의 담수로 나타났다. 정점 1~3까지의 하구역에서는 시기에 따라 염분분포의 변동 폭이 컸으며, 0.1~34.8 psu의 범위로 나타났다. 연안역에서는 홍수기인 7~8월을 제외하고는 대부분의 정점에서 30 psu 이상의 염분을 나타내었으며, 2011년 7월 조사에서 염분 1.1~21.5 psu로 나타나

Fig. 2. The daily variation of precipitation at Busan Meteorological station from Jan., 2011 to Oct., 2012.

Table 1. Cumulative monthly precipitation during survey period (from Jan., 2011 to Oct., 2012) at Busan Meteorological station, Korea

Sampling month	CMP ¹ (mm)	CPBS ² (mm)
Jan.	0	0
Mar.	31.2	26.7
Apr.	100	0
May	170	3
Jul.	418.1	147.5
Aug.	110	(1st survey) 51.2 (2nd survey) 14.6
Oct.	142.5	4
Jan.	19.5	19.5
Apr.	213.8	167.5
Jul.	502	2.5
Oct.	146.5	16

¹CMP: Cumulative monthly precipitation

²CPBS: Cumulative precipitation from ten (10) days before survey

Fig. 3. The variation of salinity of A) surface layer and B) bottom layer at Nakdong river-estuary-coastal area from Jan., 2011 to Oct., 2012.

강우의 영향으로 인해 일시적으로 하구역의 특성이 매우 크게 나타났다. 2012년 7월에는 25 psu 이상의 염분분포를 보였다(Fig. 3A).

저층 염분은 강 유역에서는 표층의 염분 분포와 비슷하였다. 하구역 및 연안역에서는 강우의 영향으로 정점 1과 2에서 2011년 7월 각각 20.6 psu와 24.1 psu, 8월 첫 번째 조사에서 0.1 psu와 0.3 psu의 분포를 보였다. 2012년 7월에는 21.9 psu와 21.8 psu의 범위였으며, 때때로 수심이 가장 낮았던 정점 2에서 염분 20 psu내외의 분포를 보이는 하였으나, 조사기간 동안 대부분의 정점에서 30 psu 이상의 분포를 보였다(Fig. 3B).

식물플랑크톤 종조성의 변화

본 조사를 통해 7문(Bacillariophyta, Dinophyta, Chlorophyta,

Table 2. Species composition of phytoplankton in Nakdong river estuary and coastal area, 2011-2012

Phylum	Class	Order	Family	Genus	Species	Ratio (%)
Bacillariophyta	3	28	44	76	260	64.7
Dinophyta	2	6	12	14	46	11.4
Chlorophyta	3	6	14	21	68	16.9
Cyanobacteria	1	5	8	11	18	4.5
Chrysophyta	1	1	1	1	4	1.0
Protozoa	1	1	1	1	1	0.2
Euglenophyta	1	2	3	4	5	1.2
	12	49	83	128	402	100

Fig. 4. The ratio of total species number of Nakdong river-estuary-coastal area from Jan., 2011 to Oct., 2012. (A) all research area (river-estuary-coastal area), (B) river zone, and (C) estuary-coastal zone.

Fig. 5. The variation of species number of Nakdong river-estuary-coastal area from Jan., 2011 to Oct., 2012. (A) all research area (river-estuary-coastal area), (B) river zone, and (C) estuary-coastal zone.

Cyanobacteria, Chrysophyta, Protozoa, Euglenophyta), 12강, 49목, 83과 128속, 402종이 분류·동정되었다(Table 2). 이 중 규조류(Bacillariophyta)가 64.7%로 가장 많은 종이 출현했으며, 녹조류(Chlorophyta)가 16.9%, 와편모조류(Dinophyta)가 11.4%의 순서로 출현하였다(Fig. 4A).

강유역에서는 5문(Bacillariophyta, Dinophyta, Chlorophyta, Cyanobacteria, Euglenophyta) 9강 29목 47과 69속 178종이 출현하였으며, 전체 종조성과 마찬가지로 규조류가 53.4%로 가장 많았으며, 녹조류가 32.6% 출현하였다(Fig. 4B).

하구역과 연안역을 포함한 수역에서는 7문(Bacillariophyta, Dinophyta, Chlorophyta, Cyanobacteria, Chrysophyta, Protozoa, Euglenophyta), 12강 49목 73과 108속 331종이 출현하였으며, 규조류 66.8%, 녹조류 14.2%, 와편모조류 13.6%가 출현하였다(Fig. 4C).

조사시기별 종조성을 살펴보면, 전 조사 수역에서 2011년 4월 총 74종(Bacillariophyta, 62종; Dinophyta, 10종; 기타, 2종)으로 가장

적게 출현하였으며, 2012년 10월에 169종(Bacillariophyta, 110종; Dinophyta, 24종; Chlorophyta, 24종; 기타, 11종)으로 가장 많은 종이 출현하였다(Fig. 5A).

강유역에서는 2011년 4월 8종(Bacillariophyta, 7종; Chlorophyta, 1종)으로 조사수역 중 가장 적은 수가 출현하였으며, 2012년 7월 76종으로(Bacillariophyta, 38종; Chlorophyta, 25종; Cyanophyta, 11종; Etc., 2종) 가장 많은 종이 출현하였다(Fig. 5B).

하구역과 연안역을 포함한 수역에서는 강유역보다 많은 종이 출현하였다. 강유역과 마찬가지로 2011년 4월 70종(Bacillariophyta, 57종; Dinophyta, 10종; 기타, 3종)으로 가장 적었으며, 2012년 10월 121종(Bacillariophyta, 94종; Dinophyta, 9종; Chlorophyta, 11종; 기타, 7종)으로 가장 많았다(Fig. 5C).

식물플랑크톤 현존량의 변화

강유역의 식물플랑크톤은 $9\sim8,621\times10^3\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 범위로 나타났으며, 2011년 8월 정점 C와 2012년 1월 정점 A에서 각각 현존량의

Fig. 6. Variability of total abundance ($\times 10^3\text{ cells L}^{-1}$) in (A) river zone and (B) estuary zone (C) coastal zone of the Nakdong river-estuary-coastal area from Jan., 2011 to Oct., 2012.

Fig. 7. Variability of greenalgae (Chlorophyta and Charophyta) abundance ($\times 10^3\text{ cells L}^{-1}$) in (A) river zone and (B) estuary zone (C) coastal zone of the Nakdong river-estuary-coastal area from Jan., 2011 to Oct., 2012.

Table 3. Common phytoplankton species in Nakdong river-estuary-coastal area, listing those species occurring 336 samples and contributing of total abundance (cells·L⁻¹) as cell counting in all samples

river-estuary-coastal area				river area				estuary-coastal area			
species (Division)	abundance (%)	Occurrence	species (Division)	abundance (%)	Occurrence	species (Division)	abundance (%)	Occurrence	species (Division)	abundance (%)	Occurrence
<i>Stephanodiscus</i> spp. (B)	65.47	210	<i>Stephanodiscus</i> spp. (B)	79.79	95	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (B)	16.94	145			
<i>Aulacoseira granulata</i> (B)	5.55	201	<i>Aulacoseira granulata</i> (B)	6.31	89	<i>Stephanodiscus</i> spp. (B)	11.70	115			
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (B)	3.97	116	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (B)	4.45	65	<i>Skeletonema</i> spp. (B)	9.79	118			
<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (B)	3.56	145	<i>Fragilaria crotonensis</i> (B)	1.65	63	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (B)	7.37	108			
<i>Skeletonema</i> spp. (B)	2.06	118	<i>Aulacoseira italica</i> (B)	1.22	42	<i>Prorocentrum triestinum</i> (D)	7.36	61			
Unclassified flagellates (UF) (freshwater species)	1.89	67	<i>Asterionella formosa</i> (B)	1.16	55	Unclassified flagellates (UF) (freshwater species)	5.60	3			
<i>Chaetoceros curvisetus</i> (B)	1.55	108	Unclassified flagellates (UF) (freshwater species)	0.91	56	<i>Aulacoseira granulata</i> (B)	3.81	112			
<i>Prorocentrum triestinum</i> (D)	1.55	61	<i>Microcystis</i> spp. (C)	0.74	16	<i>Gymnodinium</i> spp. (D)	3.48	70			
<i>Fragilaria crotonensis</i> (B)	1.46	110	<i>Anabaena spiroides</i> var. <i>crassa</i> (C)	0.49	8	Unclassified nanoflagellates (UF)	3.04	11			
<i>Aulacoseira italica</i> (B)	1.05	84	<i>Synedra</i> spp. (B)	0.47	80	<i>Ceratium furca</i> (D)	2.84	74			
<i>Asterionella formosa</i> (B)	1.00	82	<i>Pediastrum duplex</i> (Ch)	0.39	31	<i>Chaetoceros</i> spp. (B)	2.24	107			
<i>Gymnodinium</i> spp. (D)	0.73	70	<i>Westella boryoides</i> (Ch)	0.22	22	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (B)	2.19	51			
<i>Synedra</i> spp. (B)	0.67	168	<i>Actinastrum hantzschii</i> (Ch)	0.21	33	<i>Thalassiosira rotula</i> (B)	1.65	144			
<i>Microcystis</i> spp. (C)	0.65	19	<i>Pediastrum simplex</i> (Ch)	0.16	28	<i>Synedra</i> spp. (B)	1.42	88			
Unclassified nanoflagellates (UF)	0.64	11	<i>Coelastrum microphorum</i> (Ch)	0.16	40	<i>Thalassionema nitzschoides</i> (B)	0.96	168			
<i>Ceratium furca</i> (D)	0.60	76	<i>Scenedesmus quadricauda</i> (Ch)	0.15	49	<i>Pediastrum duplex</i> (Ch)	0.87	14			
<i>Pediastrum duplex</i> (Ch)	0.49	45	<i>Aulacoseira ambigua</i> (B)	0.14	6	<i>Thalassionema frauenfeldii</i> (B)	0.85	138			
<i>Chaetoceros</i> spp. (B)	0.47	107	<i>Asterionella glacialis</i> (B)	0.12	16	<i>Fragilaria crotonensis</i> (B)	0.80	47			
<i>Anabaena spiroides</i> var. <i>crassa</i> (C)	0.40	10	<i>Pediastrum boryum</i> (Ch)	0.09	24	<i>Cylindrotheca closterium</i> (B)	0.66	177			
<i>Thalassiosira rotula</i> (B)	0.35	144	<i>Peridinium</i> spp. (D)	0.09	27	<i>Paralia sulcata</i> (B)	0.57	92			

B, Bacillariophyta; D, Dinophyta; C, Cyanobacteria; Ch, Chlorophyta; UF, Unclassified flagellates

Table 4. The list of the first dominant phytoplankton species occurred (% abundance) in Nakdong river-estuary-coastal area from Jan., 2011 to Oct., 2012

	2011						2012					
	Jan.	Mar.	Apr.	May	Jul.	Aug. 1 st survey	Aug. 2 nd survey	Oct.	Jan.	Apr.	Jul.	Oct.
St.A	<i>Stephanodiscus</i> spp. (99.8)	<i>Aulacoseira granulata</i> (28.2)	Unclassified flagellates (48.1)	<i>Aulacoseira granulata</i> (51.3)	<i>Aulacoseira granulata</i> (43.5)	<i>Anabaena</i> spp. (57.3)	<i>Aulacoseira granulata</i> (28.5)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (39.8)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (98.7)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (43.0)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (24.1)	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (45.3)
St.B	<i>Stephanodiscus</i> spp. (99.8)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (32.1)	Unclassified flagellates (80.3)	<i>Westella botryoides</i> (35.5)	<i>Aulacoseira granulata</i> (55.6)	<i>Anabaena</i> spp. (55.0)	<i>Aulacoseira granulata</i> (29.4)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (29.2)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (98.2)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (46.9)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (30.3)	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (46.0)
St.C	<i>Stephanodiscus</i> spp. (99.9)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (33.0)	Unclassified flagellates (75.7)	<i>Aulacoseira granulata</i> (38.5)	<i>Aulacoseira granulata</i> (29.1)	<i>Aulacoseira granulata</i> (35.9)	<i>Aulacoseira granulata</i> (34.1)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (36.4)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (97.4)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (53.7)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (26.4)	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (61.7)
St.D	<i>Stephanodiscus</i> spp. (99.8)	<i>Aulacoseira granulata</i> (28.8)	Unclassified flagellates (88.8)	<i>Aulacoseira granulata</i> (32.7)	<i>Aulacoseira granulata</i> (54.1)	<i>Anabaena</i> spp. (44.6)	<i>Aulacoseira granulata</i> (32.8)	<i>Fragilaria crotonensis</i> (32.2)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (97.0)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (49.9)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (18.8)	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (52.8)
St.1	<i>Stephanodiscus</i> spp. (75.3)	<i>Aulacoseira granulata</i> (45.8)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (60.8)	<i>Aulacoseira italica</i> (59.4)	<i>Aulacoseira granulata</i> (33.7)	<i>Anabaena</i> spp. (42.0)	<i>Myrrocystis</i> spp. (35.6)	<i>Fragilaria crotonensis</i> (32.2)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (95.9)	<i>Synedra</i> spp. (35.5)	<i>Chaetoceros curvius</i> (31.2)	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (57.6)
St.2	<i>Aulacoseira</i> spp. (20.2)	Unclassified flagellates (86.2)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (74.8)	<i>Aulacoseira italica</i> (37.9)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (32.8)	<i>Anabaena</i> spp. (30.6)	<i>Thalassiosira rotula</i> (39.9)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (15.3)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (95.7)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (40.2)	<i>Chaetoceros curvius</i> (28.1)	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (16.8)
St.3	Unclassified Nanoflagellates (43.7)	<i>Skeletonema</i> spp. (53.3)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (78.0)	<i>Aulacoseira italica</i> (26.3)	<i>Aulacoseira</i> spp. (44.4)	<i>Aulacoseira granulata</i> (37.2)	<i>Thalassiosira rotula</i> (51.3)	<i>Rhizosolenia delicatula</i> (16.6)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (97.6)	<i>Aulacoseira granulata</i> (41.9)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (38.4)	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (25.5)
St.4	<i>Paralia sulcata</i> (39.9)	<i>Thalassiosira nitzschoides</i> (16.4)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (57.4)	<i>Prorocentrum triestinum</i> (43.3)	<i>Aulacoseira granulata</i> (39.9)	<i>Aulacoseira granulata</i> (21.0)	<i>Thalassiosira rotula</i> (30.1)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (26.9)	<i>Aulacoseira granulata</i> (23.9)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (35.5)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (45.2)	<i>Skeletonema</i> spp. (44.5)
St.5	<i>Paralia sulcata</i> (18.1)	<i>Stephanopyxis turris</i> (28.5)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (56.2)	<i>Gymnodinium</i> sp. (59.1)	<i>Aulacoseira granulata</i> (56.6)	<i>Eudorina elegans</i> (13.0)	<i>Thalassiosira rotula</i> (42.8)	<i>Rhizosolenia stouterforthii</i> (19.6)	<i>Aulacoseira granulata</i> (20.8)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (42.4)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (56.8)	<i>Skeletonema</i> spp. (35.7)
St.6	<i>Paralia sulcata</i> (33.3)	<i>Thalassiosira nitzschoides</i> (31.6)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (63.9)	<i>Prorocentrum triestinum</i> (80.3)	<i>Oscillatoria constricta</i> (29.5)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (16.4)	<i>Thalassiosira rotula</i> (36.8)	<i>Rhizosolenia stouterforthii</i> (14.1)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (21.7)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (33.3)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (43.5)	<i>Skeletonema</i> spp. (59.7)
St.7	<i>Paralia sulcata</i> (41.8)	<i>Chaetoceros curvius</i> (35.6)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (69.3)	<i>Prorocentrum triestinum</i> (82.7)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (57.3)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (24.4)	<i>Thalassiosira rotula</i> (32.4)	<i>Rhizosolenia stouterforthii</i> (25.1)	<i>Skeletonema</i> spp. (19.0)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (40.8)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (37.4)	Unclassified Nanoflagellates (30.3)
St.8	<i>Paralia sulcata</i> (63.4)	<i>Skeletonema</i> spp. (24.8)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (51.8)	<i>Prorocentrum triestinum</i> (65.7)	<i>Skeletonema</i> spp. (38.0)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (20.8)	<i>Thalassiosira rotula</i> (35.4)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (17.9)	<i>Paralia sulcata</i> (11.6)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (37.8)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (41.4)	Unclassified Nanoflagellates (25.6)
St.9	<i>Skeletonema</i> spp. (31.6)	<i>Chaetoceros curvius</i> (42.5)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (78.6)	<i>Prorocentrum triestinum</i> (48.0)	<i>Skeletonema</i> spp. (40.5)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (39.1)	<i>Thalassiosira rotula</i> (37.7)	<i>Rhizosolenia stouterforthii</i> (21.7)	<i>Stephanodiscus</i> spp. (14.6)	<i>Pseudonitzschia</i> spp. (45.9)	Unclassified Nanoflagellates (44.2)	<i>Skeletonema</i> spp. (78.9)
St.10	<i>Thalassiosira nitzschoides</i> (52.6)	<i>Chaetoceros curvius</i> (55.7)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (95.7)	<i>Prorocentrum triestinum</i> (82.5)	<i>Skeletonema</i> spp. (72.3)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (37.6)	<i>Thalassiosira rotula</i> (50.5)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (26.6)	<i>Thalassiosira rotula</i> (18.3)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (39.3)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (46.7)	<i>Skeletonema</i> spp. (60.0)

최저치와 최고치를 나타내었으며(Fig. 6A), 전 정점 평균 현존량은 2011년 $566 \pm 1,115 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 2012년 $2,272 \pm 2,895 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 나타났다.

하구역 정점에서는 $13 \sim 813 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 범위였으며, 2011년 4월 정점 2에서 가장 높았다(Fig. 6B). 2011년에는 $81 \pm 160 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 2012년에는 $365 \pm 231 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 평균 현존량을 보였다. 연안역에서는 $4 \sim 1,150 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 2011년 1월 정점 6과 2011년 7월 정점 10에서 각각 현존량의 최저치와 최고치를 나타내었다(Fig. 6C). 연안역의 평균 현존량은 2011년에는 $78 \pm 178 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 2012년에는 $136 \pm 175 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 나타났다.

담수성 녹조류의 현존량을 따로 살펴보면 강유역에서는 $0 \sim 98 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 2011년 4월과 2012년 7월 각각 최저치와 최고치를 나타냈다. 하구역에서는 2011년 1월부터 2012년 1월까지 $0 \sim 14 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 낮은 값을 나타냈으나, 2012년 4월과 7월에는 $17 \sim 14 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 다소 높은 값을 보였으며, 이후 2012년 10월에 다시 낮아지는 경향을 보였다. 연안역에서는 $0 \sim 6 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 매우 낮았으나, 강우의 양이 많았던 2011년 8월 첫 번째 조사와 2012년 7월에 다른 시기에 비해 높았다(Fig. 7).

낙동강-하구-연안역에서의 중요종

낙동강 하구 및 연안역에서 현존량과 출현빈도로 상위 20위 종을 선정하여 이 수역의 중요종으로 판단하였다(Table 3). 낙동강 하구 및 연안에 이르는 모든 수역에서 담수성 규조류인 *Stephanodiscus* spp.가 전체 현존량의 65.47%, 총 336 시료 중 210개 시료에서 출현하여 가장 중요도가 높은 종으로 나타났으며, *Aulacoseira granulata*와 *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*가 각각 2위와 3위를 차지함으로써, 강-하구-연안역에 이르는 조사수역에서 담수성 규조류의 중요도가 매우 높은 것으로 조사되었다. 또한, 20위 안에 12종의 규조류가 포함됨으로서 조사수역에서 가장 중요도가 높은 분류군이였다.

강 유역에서는 *Stephanodiscus* spp.가 전체 현존량의 79.79%, 95번 출현을 하여, 가장 중요도가 높은 종이였으며, 이를 포함하여 9종의 규조류와 7종의 녹조류가 포함되어 두 분류군이 가장 중요한 분류군으로 나타났다. 하구-연안역에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 16.94%, 145번 출현으로 가장 중요성이 높은 종으로 나타났으며, *Stephanodiscus* spp.가 11.70%, 115번 출현으로 뒤를 이었다.

낙동강-하구-연안역에서의 우점종

강유역 정점에서는 *Stephanodiscus* spp.와 *Aulacoseira granulata*가 조사기간 동안 대부분 정점에서 우점하였다. 2011년 3월에는 미동정 편모조류가 하구역 정점인 정점 2에서 출현한 이후 2011년 4월에는 강유역 전정점에서 우점하고, 하구역에서는 출현하지 않았으며, 이후 간간히 매우 소량 출현하는 현상을 보였다. 2011년 8월 첫 번째 조사에서 강우로 인해 *Anabaena* spp.가 우점하는 양상을 보였으나 이는 곧 다시 규조류로 대체되었다. 2011년 1월과 3월에는 *Stephanodiscus* spp.와 *Aulacoseira* spp.가 우점하였으며, 2011년 4월과 7월에는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 우점하였다. 8월 첫 번째 조사에서는 *Anabaena* spp.와 *Aulacoseira granulata*가 우점하였으나, 두 번째 조사에서는 *Thalassiosira rotula* 이후 10월에는 *Fragilaria crotonensis*와 *Stephanodiscus* spp.가 우점하였다. 연안역 정점에서는 대부분의 조사기간동안 규조류가 주요 우점종인 것으로 나타났다. 그러나 2011년 5월에는 와편모조류인 *Prorocentrum triestinum*이 정점 5를 제외하고 모든 정점에서 40% 이상 우점하였으며, 정점 5에서는 와편모조류인 *Gymnodinium* sp.이 50% 이상 우점하여 전 조사기간 동안 유일하게 와편모조류가 우점하는 양상을 보였다(Table 4).

식물플랑크톤 종다양성 및 군집변화

낙동강-하구-연안역에서의 식물플랑크톤 군집은 강유역보다 하구나 연안역의 다양성이 다소 높았으며, 특히 담수와 연안의 영향

Table 5. The variation of diversity indices of phytoplankton in Nakdong river-estuary-coastal area from Jan., 2011 to Oct., 2012

Station	2011								2012			
	Jan.	Mar.	Apr.	May	Jul.	Aug. 1 st survey	Aug. 2 nd survey	Oct.	Jan.	Apr.	Jul.	Oct.
St. A	0.01	0.84	0.49	0.64	0.87	0.62	0.86	0.77	0.04	0.76	0.88	0.66
St. B	0.01	0.73	0.32	0.73	0.74	0.76	0.82	0.72	0.05	0.72	0.90	0.75
St. C	0.01	0.74	0.35	0.69	0.94	0.75	0.82	0.77	0.07	0.57	0.93	0.62
St. D	0.01	0.77	0.21	0.68	0.71	0.67	0.73	0.71	0.08	0.64	1.06	0.71
mean $\pm$ S.D	0.01 $\pm$ 0.00	0.77 $\pm$ 0.05	0.34 $\pm$ 0.12	0.68 $\pm$ 0.04	0.81 $\pm$ 0.11	0.70 $\pm$ 0.07	0.80 $\pm$ 0.06	0.75 $\pm$ 0.03	0.06 $\pm$ 0.01	0.67 $\pm$ 0.08	0.94 $\pm$ 0.08	0.68 $\pm$ 0.06
St. 1	0.54	0.73	0.67	0.66	0.97	0.78	0.95	1.22	0.12	0.76	0.97	0.71
St. 2	1.18	0.26	0.54	0.96	1.02	0.88	0.89	1.35	0.13	0.94	1.06	1.31
St. 3	0.89	0.75	0.49	1.13	0.97	1.05	0.86	1.41	0.08	0.79	0.96	1.19
mean $\pm$ S.D	0.87 $\pm$ 0.32	0.58 $\pm$ 0.27	0.59 $\pm$ 0.09	0.92 $\pm$ 0.03	0.99 $\pm$ 0.03	0.90 $\pm$ 0.13	0.90 $\pm$ 0.04	1.33 $\pm$ 0.10	0.11 $\pm$ 0.03	0.83 $\pm$ 0.10	1.00 $\pm$ 0.05	1.07 $\pm$ 0.32
St. 4	0.99	1.36	0.78	0.72	0.76	1.24	1.28	1.16	1.15	1.12	0.81	1.04
St. 5	1.16	1.16	0.82	0.45	0.75	1.39	1.07	1.30	1.19	1.03	0.81	1.11
St. 6	0.93	1.14	0.70	0.41	0.91	1.40	1.09	1.39	1.18	0.99	0.92	0.81
St. 7	1.00	1.00	0.61	0.38	0.53	1.24	1.16	1.25	1.21	1.02	0.80	1.16
St. 8	0.71	1.23	0.89	0.57	0.93	1.31	0.98	1.31	1.37	1.03	0.80	1.18
St. 9	1.10	1.08	0.47	0.73	0.86	1.14	1.07	1.31	1.31	0.97	0.71	0.49
St. 10	0.71	0.85	0.11	0.33	0.34	1.12	0.92	1.22	1.23	0.78	0.78	0.75
mean $\pm$ S.D	0.94 $\pm$ 0.18	1.12 $\pm$ 0.16	0.63 $\pm$ 0.23	0.52 $\pm$ 0.18	0.73 $\pm$ 0.22	1.26 $\pm$ 0.11	1.08 $\pm$ 0.11	1.28 $\pm$ 0.08	1.23 $\pm$ 0.08	0.99 $\pm$ 0.10	0.80 $\pm$ 0.06	0.93 $\pm$ 0.26

Fig. 8. Dendrogram showing the degree of similarity among the research sites by the cluster analysis with percent similarity in Nakdong river-estuary-coastal area from Jan., 2011 to Oct., 2012.

을 동시에 받는 하구 정점보다는 연안역에서의 종다양성지수가 다소 높게 나타났다. 특히 겨울철에 해당하는 2011년 1월에는 강유역에서는 전 정점 평균 0.01이었으나, 하구역에서는 평균 0.87이었으며 연안역에서는 평균 0.94로 높았다. 이러한 경향은 2012년에도 비슷하였다(Table 5). 조사수역별로 살펴보면 강유역에서는 겨울인 1월 $0.01 \sim 0.06 \pm 0.01$ 로 종다양성지수가 매우 낮았다. 이러한 경향은 봄철에 다소 회복되었으며 주로 강우기인 7, 8월과 가을철인 10월에 0.68 이상의 높은 값을 나타냈으며, 특히 2012년 7월에는 0.94 ± 0.08 로서 강 유역에서 가장 높았다. 이 때 전 정점에서 0.88 이상의 종다양성지수를 보였으며, 정점 D에서는 1.00 이상이었다. 하구역 정점에서는 $0.11 \pm 0.03 \sim 1.33 \pm 0.10$ 으로 강유역 정점에서 다소 높은 값을 나타내었다. 강유역과 마찬가지로 강우기와 가을에 종다양성지수가 높았다. 강 유역에서는 강우기에 최대값을 나타냈던 반면 하구역 정점에서는 가을에 높게 나타나 2011년 10월에 1.33 ± 0.10 을 나타내었으며, 2012년 10월에도 1.07 ± 0.32 로 높은 종다양성지수를 보였다. 연안역 정점에서 종다양성지수는 $0.52 \pm 0.18 \sim 1.28 \pm 0.08$ 의 범위로 최대값은 하구역에서 나타났으나, 강유역이나 하구역 정점에 비해 다소 안정적이면서 상대적으로 높은 값을 유지하였다. 종다양성지수는 강우기인 2011년 8월부터 10월까지 1.0 이상으로 높은 경향을 유지하였으며, 이는 2012년 1월까지 유지되었다.

유사도에 의한 군집분석을 통해 식물플랑크톤 군집의 변화를 살

펴보면 2011년은 조사시기에 따라 다양한 군집구조를 보여주었으나, 2012년은 군집구조의 변화가 크지 않고 단순한 것으로 나타났다(Fig. 8). 2011년과 2012년 대부분의 조사시기에서는 강유역 정점은 모두 유사한 군집으로 구성되었으나, 2011년 7월 강유역 정점에서는 상류역 두 정점과 하류역 두정점이 각각 유사한 군집으로 분류되었다. 특히 2011년 8월 첫 번째 조사에서는 강유역 정점과 하구역 정점이 모두 유사한 군집으로 나타났다. 하구역 정점은 조사시기에 따라 매우 변화가 컸으며, 2011년 1월, 3월, 7월 및 8월 2차 시기에는 각 정점별로 군집 구조의 특성이 뚜렷하였으며, 2011년 4월에는 연안의 7정점이 유사하였다. 2011년 5월에는 하구역 정점 3개가 유사 군집으로 나타났으며, 2012년 7월 정점 2가 연안정점과, 2012년 10월 정점 1이 강유역 정점과 유사하였으나, 주로 정점 3개가 유사 군집으로 분류되어 2011년의 군집의 복잡성은 2012년에 다소 단순화 되는 경향을 나타내었다. 연안역 또한 2011년에는 여러개의 유사군집으로 이루어졌으나, 2012년에는 대부분의 시기에 연안역 정점이 모두 유사하여 하구역과 마찬가지로 단순화되는 경향을 보였다.

고 찰

하구역의 생물상에 영향을 미칠 수 있는 요인 중 하나인 강수량은 하구역에서 환경변화를 일으키는 주된 요인이 될 수 있을 뿐만 아

나라, 특히 낙동강 하구역과 같이 독에 의해 막힌 수역에서는 강수량에 의해 담수유출량이 결정되기 때문에 매우 중요한 요소라 할 수 있다(Park et al., 2008). 이는 담수 유입이 서식생물 및 환경에 지속적인 영향요인으로 작용하는 자연하구역과는 달리 단절된 하구역에서는 담수유입이 강수량에 따라 간헐적으로 이루어짐으로써 영양염 및 염분변화 등 환경적 요인변화가 자연하구역보다 크기 때문이라 할 수 있다.

하구독 개방시 담수 유출로 인해 하구독 하류 수역인 하구역, 그리고 연안역에서의 표층 염분 분포가 달라지는 경향을 보이나, 조사기간 동안 담수역에서는 해수 유입이 거의 없었던 것으로 나타났다. 일반적인 하구역에서는 상류에서 유입되는 담수로 인해 표층 염분이 감소하는 한편 저층에서는 염수쐐기(salinity wedge)가 형성되며, 수치모의 결과 대상 영역 내에서 염수가 하구부를 시작으로 낙동강 상류방향으로 활발하게 침입하고 있다고 보고된 바 있다(Han et al., 2011). 그러나, 강우기간 동안 하구역 및 연안역에서 담수로 인한 표층 염분 변화는 있었으나, 하구독 상부인 담수 지역에서 염수 쐐기 현상은 발견하지 못하였으며, 강유역 조사 정점 중 가장 하류였던 정점 D의 저층에서도 기수성 또는 연안성 식물플랑크톤은 발견되지 않음으로서 해수의 유입 근거는 찾을 수 없었다.

하구역·연안역에서는 2011년 하계에 비해 2012년 하계에 하구역 정점 3개에만 염분이 낮게 나타나는 특징을 보였다. 이는 조사기간 동안 월 강수량은 2012년 7월(502 mm)이 최대치임에도 조사전 10일간 누적 강수량이 2011년 7월(147.5 mm)이 2012년 7월(12.1 mm)에 비해 약 10배 이상 많아서 조사직전의 강수량의 영향으로 염분 분포의 상이함이 나타난 것으로 생각되었다(Fig. 3, Table 1).

그러나 이러한 염분분포에도 불구하고 담수 녹조류만의 현존량을 살펴보면 월 강수량이 많았던 2012년 7월에 하구-연안역의 현존량이 2011년 7월보다 높았으며, 또한 2011년 8월 첫 번째 조사보다도 높았던 것으로 나타났다(Fig. 7). 이는 염분의 분포가 조사시기 별로 변하더라도 담수 식물플랑크톤 출현이 담수의 영향은 지속적인 영향을 받는다. 이 때 녹조류 현존량의 대부분은 *Pediastrum duplex*, *Pe. simplex*, *Scenedesmus* spp.가 차지하였다.

본 조사에서 출현한 식물플랑크톤은 총 402종으로 과거 강유역과 하구 연안을 포함한 조사에서 보고되었던 437종(Moon and Choi, 1991)과 비슷하게 분류·동정되었다. 이 중 강유역에서 출현한 178종 또한 과거 낙동강 유역에서 조사되었던 식물플랑크톤(186종)과 유사하게 나타났다(Seo and Chung, 1994). 낙동강 유역 및 하구역을 포함하여 조사한 Choi et al.(2007)은 총 196종을 보고한 바 있다.

식물플랑크톤 현존량은 강유역이 하구역과 연안역보다 매우 높았으며, 전 수역에 걸쳐 2011년에 비해 2012년에 전반적으로 높은 경향을 보였다. 강유역에서 현존량이 크게 나타났던 2011년 1월과 2012년 1월에는 하구 및 연안역에 비해 10배 이상 차이가 있었다(Fig. 7). 강유역의 겨울철 많은 현존량은 *Stephanodiscus* 속에 의한 것으로 1월부터 발생한 수화현상은 3~4월까지 지속되었다. 이러한 현상은 낙동강 유역에서는 일반적인 것으로서 낙동강 하류부에 1~4월까지 발생하는 것으로 이미 보고된 바 있으며, 4월 18일 기준으로 소멸되는 것으로 나타났다(Seo et al., 2010). 그러나 2011년 1월에 비해 2012년에 2배 이상 현존량이 높은 것으로 나타났으며, 이후 빠르게 줄어들었지만, 지속적으로 우점하는 양상을 보였다. 또한, 이 속의 수화현상은 강유역에서만 발생하는 것이 아니라 하구

독 바로 아래 정점인 정점 1~3에서도 발생하고 있었으며, 이것은 영양염 농도가 높고 광량이 적을 때 강 인근 수역에서 주로 발생하는 크기가 작은 규조류(예, *Cyclotella* spp.)가 하구역에 우점하는 현상(Marshall et al., 2006)과 일치하였다. 이는 낙동강 하구역이 하구독으로 막혀 있어, 물리적으로는 단절된 상태라 하더라도 생태적으로는 완전한 단절이 이루어지지 않고 있음을 나타내주는 것이라 할 수 있다.

하구역에서는 담수와 해수의 혼합으로 인해 담수종, 기수종, 연안종, 그리고 저서(benthic)종 및 해양(pelagic)종이 혼합되어 나타난다(Cloern and Dufford, 2005). 그러나 낙동강 하구역에서는 전형적인 기수종(예: *Skeletonema* spp.)보다는 연안종과 담수종의 중요성이 더 큰 것으로 파악되었다(Table 3). *Skeletonema* spp.가 전체 시료에서 총 118번 출현하고 현존량을 기준으로 한 중요도 측면에서 전수역에서 5위, 하구 및 연안역에서 중요도 3위의 위치를 차지하고 있음에도, 현존량 면에서 담수종인 *Stephanodiscus* spp.와는 전수역에서는 30배, 하구 및 연안역에서는 약 2배 정도의 차이를 보임으로서 상대적으로 중요성이 떨어졌다. 식물플랑크톤의 현존량과 출현횟수를 기준으로 한 중요도는 수역을 대표하는 종과 가장 일반적으로 출현하는 종을 구분하게 해주며, 따라서 생태적 중요도에 대한 정보를 제공해 줄 수 있다(Cloern and Dufford, 2005).

온대지역의 연안에서 식물플랑크톤은 봄에는 규조류, 여름에는 와편모조류가 우점한다는 계절성을 정의하지만(Cloern & Dufford, 2005), 이러한 이상적인 계절적 천이는 낙동강 하구역 및 연안에서는 일어나지 않았다. 오히려 대부분이 규조류에 의해 우점되는 양상을 보였다(Table 3).

2011년 계절조사(1월, 4월, 7월, 10월)와 2012년 계절조사만의 현존량의 비율을 이용한 최고 우점종만의 수를 비교했을 때 2011년 총 13종, 2012년 10개의 종만이 우점하여 2011년에 비해 단순화되었으며, 계절적 특이성을 찾을 수 없었다.

강유역을 제외하고 하구 및 연안역에서는 주로 담수성 규조류인 *Stephanodiscus* spp. *Aulacoseira* spp. 그리고 기수 및 연안에 주로 출현하는 규조류인 *Paralia sulcata*, *Pseudo-nitzschia* spp., *Thalassiosira rotula*, *Chaetoceros curvisetus* 등이 우점하고 있었다. 이를 과거 자료와 비교해 보면, 여름에는 다른 계절에 비해 다양한 분류군들의 조성을 보여주고 있으나 봄(3, 4, 5월)에는 담수종인 *Aulacoseira* 속, *Synedra acus*, 해산종인 *Pseudo-nitzschia*, *Chaetoceros* 속의 종들이 주요 우점종으로 출현하고 여름(7, 8)월에는 와편모조류인 *Ceratium fusus*, *C. furca*, *Skeletonema costatum*이 주요 우점종으로 출현하였으며, 가을철(9, 10월)의 경우는 *S. costatum*과 *Chaetoceros* 속의 종들이 주요 우점종으로 출현하였다는 보고와 유사하다(Chung et al., 2000).

그러나 본 조사에서는 *Ceratium*속의 종이 우점한 바가 없으며, 와편모조류로서는 유일하게 2011년 5월 연안역 정점에서 *Prorocentrum triestinum*과 *Gymnodinium* spp.가 우점하였다.

한 시기 동안이지만 와편모조류 중 특히 *Prorocentrum triestinum*의 연안역 우점은 주목해볼만 하다. 일반적으로 규조류가 건강한 상태로 유지되기 위해서는 N:Si의 비율이 1:1이 되어야 하는 것으로 알려져 있으며(Redfield et al., 1963), 따라서 N:Si의 비율이 1보다 클 때, 즉 N(질산염)이 Si(규산염)보다 많을 때는 Si가 제한요인으로 작용하게 된다(Harrison et al., 1977).

낙동강 하구 및 연안 정점에서 질산염이 평균적으로 1~5월까지의 규산염보다 많았으며, 7월부터는 규산염의 양이 질산염에 비해 상대적으로 많았다(NFRDI, 2013). 따라서, 3개월 이상 지속된 규산염의 부족현상은 하구역에서 연안역으로 갈수록 더 커지고, 따라서 규조류가 외편모조류로 천이되는 원인이 되었던 것으로 예상된다. 2011년 5월 일부정점에서 우점하였던 외편모조류인 *Prorocentrum triestinum*은 정체성이 강한 수역에서 대발생할 수 있는 잠재력을 가지고 있으며, 특히 광도조건과 무기질소의 영향이 크고 NH_4 흡수에 대한 비포화상수(K_s) 값이 다른 종들에 비해 월등히 높아 암모니아에 대한 요구도가 높은 종으로 알려져 있다(Iwasaki, 1979; Seike *et al.*, 1986; Chung *et al.*, 2004). 따라서 이 시기 동안 광량이 커지고 상대적으로 암모니아 및 질산염이 높았기 때문에(NFRDI, 2013) *Prorocentrum triestinum*의 우점이 발생했던 것으로 생각된다. Jeong *et al.*(2013)은 질산염에 비해 규산염의 양이 낙동강 하구역과 섬진강 하구역에서 겨울철에 비해 여름철에 많은 경향을 나타내고 있다고 보고하였으며, 이 때 낙동강 하구역은 본 연구의 연안역을 포함하고 있다. 따라서 겨울에서 봄으로 이어졌던 규조류의 우점 현상은 규산염의 부족으로 인해 외편모조류인 *Prorocentrum triestinum*으로 천이되었으며, 이후 강우로 인한 담수의 유입으로 다시 규조류로 천이된 것으로 생각된다.

하구역이 담수종과 연안종이 섞임으로서 종다양성이 높을 것으로 예상되었고 또한 일부 연구에서 염분 5~8 psu 정도에서 식물플랑크톤의 종 다양성이 높아진다고 보고 된 바 있으나(Telesch, 2004), 본 연구에서는 일부시기를 제외하고는 하구역보다는 연안쪽에서의 종 다양성이 다소 높게 나타났다. 이는 식물부착성 규조류(*Cocconeis scutellum*, *Grammatophora marina* 등), 저서성 규조류(*Achnanthes* spp., *Cylindrotheca closterium*, *Diploneis* spp., *Gyrosigma fasciola* 등), 그리고 담수성 식물플랑크톤(*Pediastrum* spp., *Scenedesmus* spp. 등)이 출현함으로써 적은 종수임에도 이미 Hutchinson(1961)에 의해 강조되고 Cloern & Dufford(2005)에서도 확인되었던 이동과정으로서의 저서성-부착성 규조의 부유, 담수성 플랑크톤의 유입으로 인한 플랑크톤의 종 풍부성 증가를 확인시켜준 결과라고 할 수 있다. 이 외에도 중국의 Pearl 강 하구역에서는 담수의 영향이 커질수록 하구역의 식물플랑크톤 다양성이 낮아지고 있었으며(Huang *et al.*, 2004), Remane's 모델은 염분 5~10 psu 사이에서 식물플랑크톤의 다양성이 낮을 수 있다고 예측한 바 있다(Muylaert *et al.*, 2009).

유사도를 이용한 낙동강, 하구, 연안의 식물플랑크톤의 군집은 시기에 따라 매우 변화가 큰 것으로 보인다. 일반적으로 크게 강, 하구, 연안의 세 군집 또는 강, 하구 및 연안의 두 군집이 유사하게 나타났다. 그러나, 유사도 50%를 기준으로 2011년에는 많게는 4개 이상의 유사한 군집으로 나타나 정점별, 수역별 특이성이 나타난 반면 2012년에는 3개 이하의 유사 군집으로 나타나 2011년에 비해 단순화된 군집 특성을 보였다. 강-하구-연안역에서 군집 이러한 변화의 원인은 하구둑의 수문 개폐로 인한 것으로 예상되었으며, Chung *et al.*(2000) 또한 하구둑의 수문 개폐에 따라 수괴의 변화는 물론 하구 생태계의 식물플랑크톤 군집 구조가 현저히 다른 양상을 보여주고 있다고 보고한 바 있다.

그러나 2011년에 비해 전반적으로 높아진 식물플랑크톤의 현존량, 단순화된 우점종의 수 및 군집 구조 등은 연구 시 예상하지 못했거나 간과했던 요인때문으로 생각된다. 현재 낙동강 유역 및 하

구역은 상류역의 급격한 환경변화로 인해 식물플랑크톤 군집 또한 큰 변화를 겪고 있는 것으로 보인다.

따라서, 본 연구에서 다루지 못했던 낙동강-하구-연안의 영양염 분포 변화, 담수유출 및 범위, 조석 및 조류변화, 이러한 환경변화에 따른 식물플랑크톤 및 기타 부유생물, 저서생물등을 포함한 생물 군집의 변화 등 통합적인 생태 연구가 이루어져야 하며, 이와 함께 시기에 따라 장기 조사 및 단기 조사도 함께 수행되어야 할 것으로 생각한다.

사 사

이 연구는 국립수산물과학원(첨단해양탐사 시스템 활용 한반도 주변 해양변동 조사 및 운용)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한 논문을 쓰는데 힘이 되주신 (사)한국여성과학기술단체총연합회와 (사)유망여성과학기술인네트워크에도 감사드립니다.

참고문헌(References)

- Algaebase, www.algaebase.org.
- Choi, C.-M., J.-H. Choi, W.-I. Kim, J.-S. Lee, G.-B. Jung, J.-T. Lee and S.-G. Moon, 2007. Phytoplankton flora and community structure in the lower Nakdong river. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, **26**: 159–170 (in Korean).
- Chung, I.K., Y.J. Kang, O.-S. Kwon and J.K. Seo, 2000. The ecology of phytoplankton in the Nakdong Estuary. *Algae*, **15**: 99–110 (in Korean).
- Chung, M.H., H.S. Kim, C.I. Choi and S.J. Hwang, 2004. Phytoplankton and environmental factors in lake Hwaong. *Korean J. Limnol.*, **37**: 193–204 (in Korean).
- Chung, J., 1993. Illustration of the freshwater algae of Korea. Academic press, Seoul, 496pp.
- Cloern, J.E., A.E. Alpine, B.E. Cole, R.L.J. Wong, J.F. Arthur and M.D. Ball, 1983. River discharge controls phytoplankton dynamics in the northern San Francisco Bay Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **16**: 415–429.
- Cloern, J.E. and R. Dufford, 2005. Phytoplankton community ecology: principles applied in San Francisco Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **285**: 11–28.
- Han C.S., S.K. Park, S.W. Jung and T.Y. Roh, 2011. The study of salinity distribution at Nakdong river estuary. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, **23**: 101–108 (in Korean).
- Harrison, P.J., H.L. Conway, R.W. Holmes and C.O. Davis, 1977. Marine diatoms in chemostats under silicate or ammonium limitation. III. Cellular chemical composition and morphology of three diatoms. *Marine Biology*, **43**: 19–31.
- Hutchinson, G.E., 1961. The paradox of the plankton. *Am. Nat.*, **95**: 137–147.
- Huang, L., W. Jian, X. Song, X. Huang, S. Liu, P. Qian, K. Yin and M. Wu, 2004. Species diversity and distribution for phytoplankton of the Pearl River estuary during rainy and dry seasons. *Marine Pollution Bulletin*, **49**: 588–596.
- Isamu, Y., 1982. Illustrations of the marine plankton of Japan. Hoikusha Publishing, Osaka, 537 pp.
- Iwasaki, H., 1979. The physiological characteristics of neritic red tide

- flagellates. In Toxic dinoflagellates blooms, edited by Taylor, D.L. and H.H. Seliger. Elsevier, North Holland, pp. 95–98
- Jeong, D.H., H.H. Shin, S.W. Jung and D.I. Lim, 2013. Variations and characters of water quality during flood and dry seasons in the eastern coast of south sea, Korea. Korean J. Environ. Biol., **31**: 19–36 (in Korean).
- Kim, D.-K., K.-S. Jeong, P.A. Whigham and G.-J. Joo, 2007. Winter diatom blooms in a regulated river in South Korea: explanations based on evolutionary computation. Freshwater Biology, **52**: 2021–2041.
- Kwon, K.-Y., P.-G. Lee, C. Park, C.H. Moon and M.O. Park, 2001. Biomass and species composition of phytoplankton and zooplankton along the salinity gradients in the Seomjin river estuary. The Sea, **6**: 93–102 (in Korean).
- Lee, K.-H., B.-H. Rho, H.-J. Cho., and C.-H. Lee, 2011. Estuary classification based on the characteristics of geomorphological features, natural habitat distribution and land uses. The sea, **16**: 53–69 (in Korean).
- Marshall, H.G., R.V. Lacouture, C. Buchanan and J.M. Johnson, 2006. Phytoplankton assemblages associated with water quality and salinity regions in Chesapeake Bay, USA. Estuarine, Coastal and Shelf Science, **69**: 10–18.
- Mizuno, T., 1964. Illustrations of the freshwater plankton of Japan. Hoikusha Publishing, Osaka, 351pp.
- Moon, C.H., and H.-J. Choi, 1991. Studies on the environmental characteristics and phytoplankton community in the Nakdong river estuary. The Journal of the Oceanologica Society of Korea, **26**: 144–154 (in Korean).
- Muyllaert, K., K. Sabbe and W. Vyverman, 2009. Changes in phytoplankton diversity and community composition along the salinity gradient of the Schelde estuary (Belgium/The Netherlands). Estuarine, Coastal and Shelf Science, **82**: 335–340.
- NFRDI. 2013. A white book on estuary fishing ground. 290 pp.
- Nybakken, J.W., 1997. Marine biology: An ecological approach. Wesley Education Publishers Inc., 481pp.
- Park, S., H.-S. Yoon, I.-C. Lee, and H.-T. Kim, 2008. Correlation between meteorological factors and water discharged from the Nakdong river barrage, Korea. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, **14**: 111–117 (in Korean).
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum, and A. Richards, 1963. The influence of organisms on the composition of sea water. In The Sea, Vol. 2., edited by Hill, M.M., Interscience, New York, pp. 26–77.
- Reynolds, C.S., 1983. A physiological interpretation of the dynamic responses of populations of a planktonic diatom to physical variability of the environment. New phytol., **95**: 41–53.
- Round, F.E., R.M. Crawford and D.G. Mann, 1990. The diatoms: Biology & morphology of the genera. Cambridge University Press, U.K. 747 pp.
- Seike, Y., K. Kondo, Y. Date and Y. Ishida, 1986. Nitrogen metabolism in the brackish Lake Nakanoumi (I), Uptake rate of inorganic nitrogen by phytoplankton. Jpa. J. Limnol., **47**: 121–132.
- Seo, J.K., and I.K. Chung, 1994. The phytoplankton community structure in the Nakdong river mouth. Korean J. Limnol., **27**: 227–250.
- Seo, J.K., H.J. Lee and I.K. Chung, 2010. The community Dynamics of microbial food web during algal bloom by *Stephanodiscus* spp. in downstream of Nakdong river. Korean J. Environ. Biol., **28**: 172–178 (in Korean).
- Sin, Y., Y. Lee., K. Cho, E. Song, 2005. Trends of phytoplankton community and water quality and implications for management in estuarine river systems. Korean J. Limnol., **38**: 160–180 (in Korean).
- Shim, J.H., 1994. Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea. Vol. 34. Marine phytoplankton. Ministry of Education Republic of Korea, 487 pp. (in Korean).
- Telesh, I.V., 2004. Plankton Baltic estuarine ecosystems with emphasis on Neva Estuary: a review of present knowledge and research perspectives. Marine Pollution Bulletin, **49**: 206–219.
- Tomas, C.R., 1997. Identifying marine phytoplankton. Academic press. 853 pp.
- UNESCO. 1978. Phytoplankton manual. UNESCO, UK, 337pp.
- Yoon, H.-S., C.-H. Yoon, C.-I. Yoo and J.-H. Park, 2010. Effects of Busan-Gimhae precipitation conditions on the real barrage discharge in the Nakdong river basin. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, **16**: 169–174 (in Korean).

2013년 10월 28일 원고접수

2013년 11월 5일 수정본 접수

2013년 11월 6일 수정본 채택

담당편집위원: 강창근