

동해 연안 수괴 특성에 따른 식물플랑크톤 우점종의 계절 변동

심정민* · 권기영**† · 김상우** · 윤병선**

*, ** 국립수산물과학원 동해수산연구소 자원환경과

Seasonal Change of Phytoplankton Dominant Species
Based on Water Mass in the Coastal Areas of the East Sea

Jeong-Min Shim* · Ki-Young Kwon**† · Sang-Woo Kim** · Byong-Seon Yoon**

*, ** East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Gangneung 25435, Korea

요 약 : 동해 연안 식물플랑크톤의 계절별 분포 특성과 해양환경 요인과의 상호관계를 파악하기 위하여 2009년 2월, 5월, 8월 및 11월에 연안 18개 정점에 대해 조사하였다. 조사기간 중 출현한 식물플랑크톤은 규조강 37종, 와편모조강 22종, 유글레나조강 1종, 규질편모조강 3종 및 은편모조강 1종으로 나뉘었다. 현존량은 1.2×10^3 - 246.6×10^3 cells/L(평균 24.8×10^3 cells/L)의 분포 범위를 보였으며 5월에 가장 높았다. 주요 우점종은 *Leptocylindrus danicus*, *Chaetoceros affinis*, *Pseudo-nitzschia pungens* 및 *Thalassionema nitzschioides* 등이 출현하였다. 해양환경 요인과의 상관분석 결과 식물플랑크톤 현존량은 pH, 용존산소, 클로로필-a 및 부유물질과 양의 상관관계를 보였으며, 규산규소와는 음의 상관관계를 보였다. 식물플랑크톤 우점종의 계절 변동은 등밀도선 상의 수온(T)-염분(S)도로 구분한 수괴 특성에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 특히 5월은 수온, 8월은 염분 분포와 관계가 있었다. 현존량과 종조성을 바탕으로 다원척도 분석을 한 식물플랑크톤의 공간적인 분포는 경북 죽변과 울진을 기점으로 강원연안 그룹(Group A)과 경북연안 그룹(Group B)으로 나뉘어졌다.

핵심용어 : 식물플랑크톤 우점종, 종조성, 현존량, 상관계수, 수괴

Abstract : In order to understand the seasonal change of phytoplankton as well as the effect of water physico-chemical parameters, we investigated 18 stations in coastal areas of the East Sea in February, May, August and November in 2009. The taxa of phytoplankton observed in this study were classified as 37 Bacillariophyceae, 22 Dinophyceae, 1 Euglenophyceae, 3 Dictyophyceae and 1 Cryptophyceae. Phytoplankton abundance ranged from 1.2×10^3 cells/L to 246.6×10^3 cells/L(with a mean value of 24.8×10^3 cells/L), the highest biomass was observed in May. The dominant species were *Leptocylindrus danicus*, *Chaetoceros affinis*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Thalassionema nitzschioides* and etc. Pearson's correlation co-efficient between phytoplankton abundance and other water parameters showed the positive relationships with pH, DO, Secchi-disk depth, and SS, the negative relationships with SiO_2-Si . Seasonal patterns of phytoplankton dominant species were affected by the characteristics of water masses based on T-S diagram analysis. In particular, phytoplankton distributional patterns were related with water temperature in May and salinity in August, respectively. According to the result of MDS(Multi-dimensional scaling) using the phytoplankton abundance and species composition, the spatial distribution of phytoplankton were characterized with Ganwon(Group A) and Gyeongbuk(Group B) at the coastal areas of Jukbyeon or Uljin.

Key Words : Phytoplankton dominant species, Species composition, Abundance, Correlation co-efficient, Water mass

1. 서 론

식물플랑크톤은 기초생산자로서 해양의 먹이사슬 구조에 영향을 미치며, 수소이온농도, 빛, 수온 등의 환경 변화에 따라 종조성이 영향을 받는 등 수질 환경 지표생물로서도 중

요성이 크다(Buzzi, 2002; Rey et al., 2004). 식물플랑크톤 현존량과 종조성은 시·공간적으로 큰 변동성을 가지며(Moon and Choi., 1991; Kim et al., 1998; Kwon et al., 2001), 특히 동해 연안에서의 식물플랑크톤 군집구조의 계절적인 변동은 대마난류의 지류인 동한난류의 북상과 남하하는 북한한류의 영향을 받으며, 이들 해류가 계절에 따라 연안으로 접근과 이안함으로서 그 변동성이 크게 나타난다(Jang et al., 2013). 따

* First Author : jmsim67@korea.kr, 033-660-8532

† Corresponding Author : oceanmc@korea.kr, 033-660-8534

동해 연안 수괴 특성에 따른 식물플랑크톤 우점종의 계절 변동

라서 동해에서 발생하는 식물플랑크톤의 대증식 양상은 같은 연안 해역에서도 시기에 따라 차이가 크게 나타난다 (Yamada et al., 2004; Yoo and Kim, 2004).

동해안 식물플랑크톤에 관한 연구는 남·서해 연안에 비하여 상대적으로 적은 연구가 수행되었지만, 다양한 분야에서 접근을 시도한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 1980-1990년대에는 식생연구나 군집 분포 특성, 생산력에 관한 연구가 광범위한 해역에 걸쳐서 연구되어 왔으며(Shim and Lee, 1987; Lee and Shim, 1990; Lee et al., 1998; Shim et al., 1985; 1992; 1995), 식물플랑크톤의 크기별 분포와 특성에 관한 연구(Cho 1985; Lee and Chang, 2014)도 다수 수행되었다. 최근에는 색소체 분석을 활용하거나 인공위성 해색(Ocean Color) 관측 자료를 이용하여 동해 전역에 대한 식물플랑크톤 증식의 원인 규명 등 첨단장비를 활용한 연구와 생태계 모델을 이용한 식물플랑크톤의 시·공간적인 변동에 관한 연구도 수행되고 있다(Choi et al., 2004b; Kim et al., 2000; 2002; 2003). 특히 동해안 식물플랑크톤에 관한 연구는 냉수대 등 이상해황이 빈번하게 발생하는 동해 남부연안의 식물플랑크톤 군집 연구나(Shim et al., 1992; Oh et al., 2004; 2008; Kim et al., 2014a), 난·한류가 교차하는 전선역에서의 식물플랑크톤 군집 연구(Park et al., 1991) 등에 집중되어 있다. 또한, 동해안 원전 주변 해역이나 동해 일부 항 등 국한된 해역의 식물플랑크톤 군집에 관한 연구도 다수 이루어졌다(Choi et al., 2004a; 2004b; Kang and Choi, 2002; Kang et al., 2002; 2005). 그러나 동해 전 연안에 대한 식물플랑크톤 군집에 관한 연구 결과는 다소 미흡한 실정이며, 계절별 환경요인과 식물플랑크톤과의 상호관계를 이해하기에는 부족하다.

본 연구는 강원 거진에서 경북 감포에 이르는 동해 주요 연안의 수온(T)과 염분(S) 자료를 활용한 T-S도상의 식물플랑크톤 우점종 분포 특성 등 계절별 식물플랑크톤 군집분포 특성과 물리·화학적 요인과의 상호관계를 살펴보고자 한다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 동해 중부의 강원 거진에서 동해 남부의 경북 감포까지 동해 주요연안 18개 정점(E1-E18)에 대해 2009년 2월부터 11월까지 연 4회(2, 5, 8, 11월) 조사를 실시하였다 (Fig. 1, Table 1). 조사 정점의 수온과 염분 특성은 국립수산 과학원 시험조사선 탐구 12호을 이용하여 CTD(SBE 19 plus)로 측정하였으며, 화학적 요인 분석용 시료 채취는 표층과 저층에서 니스킨 채수기(Niskin sampler)를 이용하였다. 수질 분석은 해양환경공정시험방법(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)에 따라 측정하였다. pH는 선상에서 pH 측정기(Orion 5-STAR, Singapore)를 이용하여 측정하였으며,

투명도는 투명도판(Secchi-disk)을 이용하여 측정하였다. 용존산소(DO)는 선상에서 해수를 용존산소 병에 고정된 후 Winkler 법으로 분석하였다.

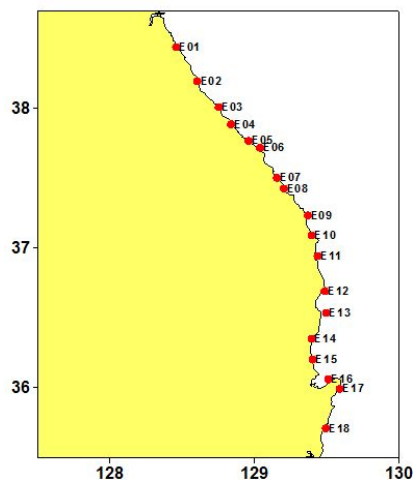


Fig. 1. Map showing the sampling stations of the coastal areas of the East Sea.

Table 1. The location of sampling stations in each area

St.	Area	Latitude	Longitude	Depth
E01	Geojin	38°26'25"	128°27'35"	10
E02	Sokcho	38°11'59"	128°36'18"	22
E03	Yangyang	38°00'45"	128°45'01"	24
E04	Chumunjin	37°53'09"	128°50'15"	18
E05	Gangneug Namdaechon	37°46'04"	128°57'42"	19
E06	Gangneug Okgae	37°43'00"	129°02'14"	64
E07	Donghae	37°30'11"	129°09'17"	26
E08	Samchuck	37°25'48"	129°12'08"	17
E09	Yimwon	37°14'00"	129°22'01"	44
E10	Jukbyeon	37°05'55"	129°23'56"	30
E11	Uljin	36°56'48"	129°26'05"	47
E12	Hupo	36°41'40"	129°29'01"	20
E13	Chucksan	36°32'04"	129°29'59"	38
E14	Ganggu	36°21'00"	129°23'51"	29
E15	Wolpo	36°12'06"	129°24'01"	37
E16	Pohang	36°03'56"	129°30'46"	25
E17	Gurongpo	35°59'52"	129°35'17"	38
E18	Gampo	35°42'55"	129°29'45"	22

영양염(DIN(NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N의 합), DIP, SiO₂-Si)은 현장에서 여과지(Whatman GF/F)로 여과 후, 여과된 시료를 분석 시까지 냉동 보관하였으며, 영양염 자동분석기(Seal Analytical

QuAAtro, Germany)를 이용하여 분석하였다. 클로로필-a 농도 분석은 층별 해수 500 mL를 공경 0.45 μm 멤브레인 여과지(Whatman 47 mm)로 여과한 후 여과지를 10 mL의 90% 아세트산 용액에 넣어 냉암소에서 24시간 색소를 추출한 후 그 상등액을 형광분광광도계(Turner Designs 10AU, USA)로 분석하였다.

식물플랑크톤의 종조성과 정량분석은 니스킨 채수기를 이용하여 해수 1L를 채취 후, 루골(Lugol)액을 1-2% 첨가하여 고정시킨 후 실험실내에서 1-2일간 정치 후 20 mL로 농축하여 검경하였으며, 밀도는 cells/L로 표시하였다. 종의 동정은 Thomas(1997)와 Shim(1994) 등을 참고하여 광학현미경(Zeiss Axiolab)으로 분석하였다.

물리·화학적 요인과 식물플랑크톤 군집간의 분석은 SPSS 패키지(version 12.0, SPSS Institute USA)을 이용하여 상관계수(Pearson Correlation Coefficient)를 구하였다. 수괴 특성에 따른 정점별 우점종 변동 특성을 파악하기 위하여 등밀도선상에 수온(T)과 염분(S)의 T-S도를 작성하고, 식물플랑크톤의 월별 정점별 우점종과 현존량을 T-S도 상에 표시하여 분포양상을 분석하였다. 식물플랑크톤의 공간적 분포 특성은 조사시기와 정점별 식물플랑크톤 군집의 유사도 분석(Similarity Analysis)인 Bray-Curtis 지수(Bray and Curtis, 1957)를 사용하였으며, 그룹간 유사도 분포는 다원척도분석(MDS, multi-dimensional scaling)에 의한 2차원 공간에서 군집의 유사성을 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 물리·화학적 분포

동해안 정점 E1-E18에서 2009년 2월, 5월, 8월 및 11월에 조사한 계절별 표층의 수온, 염분, 영양염 등에 대한 물리·화학적 인자의 변동 범위와 평균 및 표준편차를 Table 2에 나타내었다.

조사기간 중 표층 수온은 6.07-26.59 $^{\circ}\text{C}$ 로서 2월 강원 북부해역의 E1(거진)이 6.07 $^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮은 수온을 보였다. 염분의 분포범위는 29.98-34.35로서 2월이 가장 높았고, 8월이 가장 낮았다. 특히, 8월은 다른 조사월에 비해 정점별 변화가 뚜렷하여 E14(강구)에서 29.98로 가장 낮았고, 전반적으로 강원연안보다 경북연안에서 낮아 32 이하의 분포범위를 보였다. pH는 7.98-8.33로서 11월에 최소를 보였고 8월에 최대를 나타내었다. DO는 7.22-10.16 mg/L로서 5월이 다소 높고 8월이 낮았다.

투명도(Transparency depth)는 4.0-18.0 m로서 2월이 깊고 5월이 얕았으며 전반적으로 비슷한 투명도 값을 보였다. 용존무기질소(DIN)는 0.34-20.18 μM , 용존무기인(DIP)은 0.01-1.30 μM 및 규산규소($\text{SiO}_2\text{-Si}$)는 0.11-19.95 μM 의 분포를 보였다(Fig. 2). DIN과 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 는 전 연안 해역에서 2월에 가장 높았고 수

Table 2. Surface Water parameter in the coastal areas of the East Sea in 2009

Parameter	Range	Mean \pm SD
Temperature($^{\circ}\text{C}$)	6.07-26.59	16.23 \pm 4.96
Salinity	29.98-34.35	33.24 \pm 1.15
pH	7.98-8.33	8.10 \pm 0.07
DO(mg/L)	7.22-10.16	8.37 \pm 0.68
DIN(μM)	0.34-20.18	5.43 \pm 4.13
DIP(μM)	0.01-1.30	0.35 \pm 0.27
$\text{SiO}_2\text{-Si}(\mu\text{M})$	0.11-19.95	7.39 \pm 4.77
Chlorophyll-a($\mu\text{g/L}$)	0.01-4.38	1.32 \pm 0.79
Transparency depth	4.0-18.00	8.00 \pm 2.67

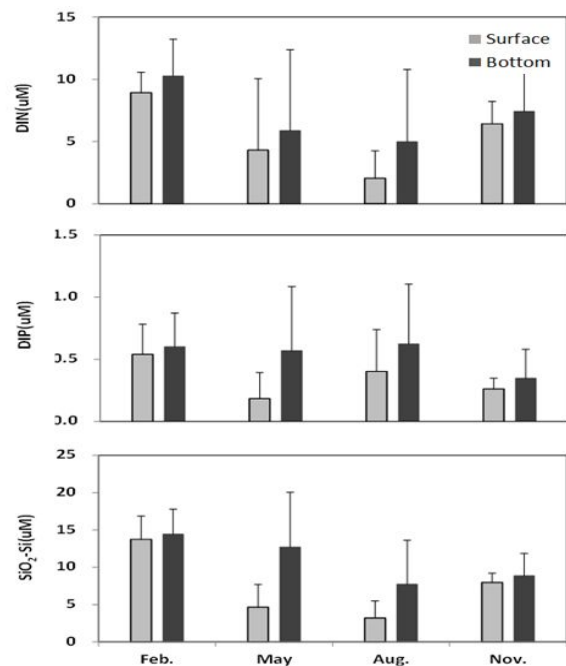


Fig. 2. Seasonal variation of DIN, DIP and $\text{SiO}_2\text{-Si}$ in the coastal areas of the East Sea in 2009.

온이 상승하면서 8월에 연중 가장 낮은 농도를 보였다. DIP는 2월과 8월이 비교적 높은 농도를 보였으며, DIN과 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 와 달리 8월에 높은 것은 하천수의 유입에 의한 것으로 보인다.

클로로필-a는 0.01-4.38 $\mu\text{g/L}$ 의 분포로서 8월에 가장 높았고 11월에 가장 낮았다. 동해 남부연안 기초생산력에 대한 Shim et al.(1985, 1992)의 연구 결과에 의하면 표층에서 40 m 수심까지 클로로필-a 분포가 0.50-14.85 $\mu\text{g/L}$ 정도의 분포로서 본 연구의 결과보다는 최대 농도를 기준으로 3배 정도, 최소 농도 기준으로는 5배 정도 높게 나타났다. 이처럼 본 연구에

동해 연안 수괴 특성에 따른 식물플랑크톤 우점종의 계절 변동

서 클로로필-a 농도가 다른 연구 결과보다 낮은 것은 이화학적 성분 분석이 표층에 국한된 것에 기인한다.

3.2. 식물플랑크톤의 현존량과 우점종 분포

동해안에서 계절별로 출현한 식물플랑크톤의 현존량과 우점종을 Table 3과 Fig. 3에 각각 나타내었다. 월별 현존량 분포는 2월에는 1.6×10^3 - 11.6×10^3 cells/L(평균 4.0×10^3 cells/L)로서 정점별 개체수의 공간분포 차이는 비교적 크지 않았으나, 강원보다는 경북연안에서 상대적으로 개체수가 많았다. 5월에는 2.6×10^3 - 246.6×10^3 cells/L(평균 53.1×10^3 cells/L)로 전체 조사 기간 중 가장 높은 현존량을 보였고, 이때 E12(후포)부터 E17(구룡포) 해역까지 *Leptocylindrus danicus*가 150×10^3 cells/L 이상의 상대적으로 높은 출현 개체수 분포를 보였다. 8월에는 3.6×10^3 - 65.3×10^3 cells/L(평균 25.2×10^3 cells/L)로서 E14(강구), E17(구룡포) 및 E18(감포) 해역에서 50×10^3 cells/L 이상의 상대적으로 높은 분포를 보였다. 8월은 5월보다 상대적인 현존량은 적지만, E08(삼척), E10(죽변), E14(강구), E17(구룡포) 및 E18(감포)에서 30×10^3 cells/L 이상으로 다른 지역보다 높게 나타났다. 11월에는 1.2×10^3 - 56.6×10^3 cells/L(평균 16.9×10^3 cells/L)로서 *Cryptomonas* sp.가 출현하지 않은 E14(축산) 이남 해역의 개체수가 매우 낮았으며, E01(거진)과 E06(강릉 옥계) 해역에서 다른 해역에 비해 높았다.

식물플랑크톤의 현존량은 1.2×10^3 - 246.6×10^3 cells/L(평균 24.8×10^3 cells/L) 분포로 정점별, 월별 개체수의 지역적인 차이가 매우 크게 나타났으며, 강원연안(평균 12.6×10^3 cells/L)에 비해서 경북연안(평균 40.0×10^3 cells/L)에서 높았다(Fig. 3). 월별로는 2월(평균 4.0×10^3 cells/L)이 가장 낮았고, 5월(평균 53.1×10^3 cells/L)이 가장 높았으며, 계절별 차이는 있으나 소형 규조류가 식물플랑크톤의 전체 현존량 중 상당부분을 차지하고 있었다. 동해연안은 동계에 형성된 깊은 혼합층내의 풍부한 영양염이 춘계에 일사량의 증가에 따른 혼합층의 감소와 함께 임계수심(Critical depth) 내의 광합성 활동이 증가하여 춘계 식물플랑크톤 대증식이 발생한다. 추계식물플랑크톤의 대증식은 하계에 성층화된 수괴가 해면 냉각에 의해 성층이 파괴되면서 혼합층이 깊어지고, 성층의 파괴와 함께 표층 아래의 풍부한 영양염이 공급되면서 발생한다. 특히 Sverdrup(1953) 이론에서 나타난 바와 같이 혼합층이 깊어지고 임계수심이 알아지면서 이들이 중첩되는 시점에 추계 식물플랑크톤 대증식이 발생한다(Kim et al., 2000; Kim et al., 2003; Yamada et al., 2004). 본 연구에서도 춘계(5월) 식물플랑크톤의 현존량이 연중 가장 높은 것으로 나타났고, E12(후포), E13(축산), E13(강구) 및 E17(구룡포)는 100×10^3 cells/L 이상을 보였으나, 본 연구에서의 식물플랑크톤의 현존량은 대량발생 정도에 미치지 못하는 매우 낮은 수준이었다. 동해

안에 자주 출현하는 와편모조류는 *Protoperdinium*, *Ceratium*, *Prorocentrum*속으로 이들 속의 출현량이 전체 와편모조류의 출현량 중 54.8%를 차지한다고 알려져 있으며(Shim et al., 1995), 본 연구에서는 하계에 *Prorocentrum*속의 출현량이 많았으며 전반적으로 와편모조류의 출현량과 종수가 다양해지는 경향을 보였다.

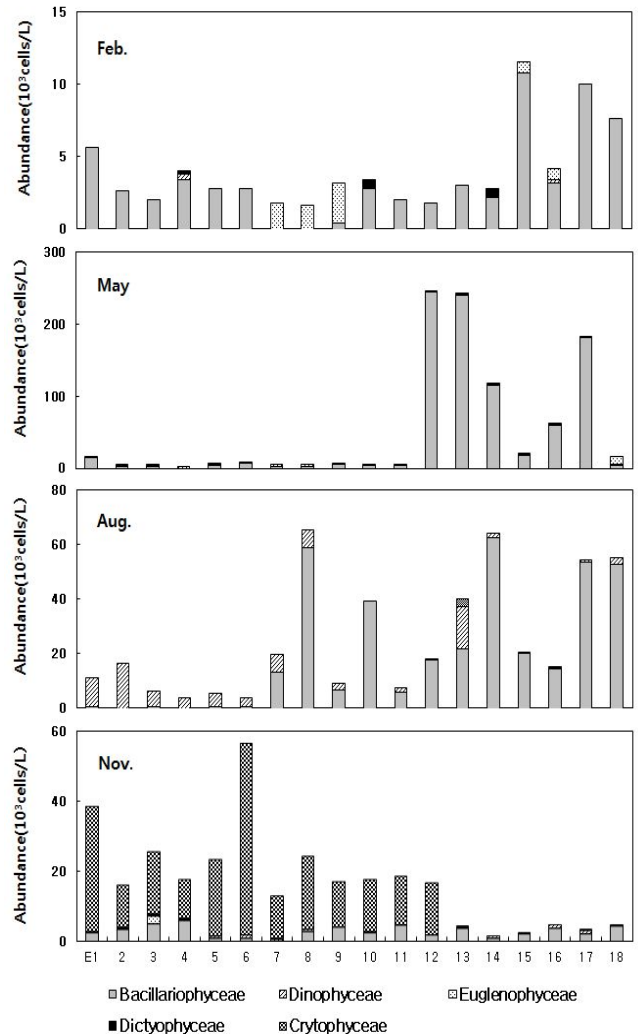


Fig. 3. Seasonal variation of phytoplankton abundance in the coastal areas of the East Sea in 2009.

우점종 분포는 2월의 경우 강원 북부연안은 *Pseudo-nitzschia delicatissima*, 강원 남부연안은 *Eutreptiella gymnastica*로 나타났으며, 경북의 북부와 남부 연안은 각각 *Lauderia annulata*와 *Chaetoceros pseudocurvisetus*가 우점하였다. 5월에는 경북 후포 연안을 기준으로 이북해역은 *Chaetoceros affinis*와 *Chaetoceros didymus*, 이남해역은 *Leptocylindrus danicus*가 극우점하였다. 8월

에는 수온 상승으로 강원 북부해역에서 편모조류인 *Prorocentrum micans*와 *Prorocentrum triestinum*이 우점 출현하였으며, 강원 동해에서 경북 울진연안에서는 *Leptocylindrus danicus*와 *Chaetoceros affinis*, 경북 후포 이남연안에서는 *Chaetoceros affinis*와 *Pseudo-nitzschia pungens*가 출현율이 높았다. 5월과 8월에 우점 출현한 *Chaetoceros affinis*는 *Chaetoceros lorenzianus* 등과 함께 동해 남부해역의 하계에 주로 출현하는 대마난류 지표종이다(Park et al., 1991; Karawada, 1965; Matoda and Marymo, 1963). 11월에는 E1(거진)에서 E12(후포) 연안에 *Cryptomonas* sp.의 출현율이 높았으나 축산 이남해역에는 뚜렷한 우점종이 출현하지 않았으며 현존량 또한 10 cells/L 이하로 매우 낮았다.

3.3. 식물플랑크톤의 종조성

조사기간 중 동해안에서 출현한 식물플랑크톤의 종수는 총 64종으로 Fig. 4에 나타난 바와 같이 크게 규조강(Bacillariophyceae), 와편모조강(Dinophyceae), 유글레나조강(Euglenophyceae), 규질편모조강(Dictyophyceae) 및 은편모조강(Cryptophyceae) 총 5개 분류군이 출현하였으며, 계절별 출현종수는 2월에 22종, 5월에 33종, 8월에 33종, 11월에 36종이 출현하여 11월에 출현종이 가장 많았고, 2월에 출현종이 가장 적었다(Fig. 4). 조사기간 중 동해안에 출현한 식물플랑크톤의 종수는 총 38속 64종이었으며, 분류군별로는 규조강이 총 37종 출현하여 전체 출현종수에서 57.8%를 차지하였으며, 그 다음으로 와편모류가 22종 출현하여 전체 출현종수에서 34.4%를 차지하였다. 그 외 유글레나조류 1종, 규질편모조류 3종, 은편모조류 1종 출현하였다.

동해 해역에 출현한 식물플랑크톤에 대한 보고에 따르면 1980년대 초에는 185종으로 보고되었으며 당시 124종의 규조강, 56종의 와편모조강이 출현하였고(Shim and Lee, 1983), 1980년대 후반 조사에서는 190종이 출현하였다(Shim et al., 1995).

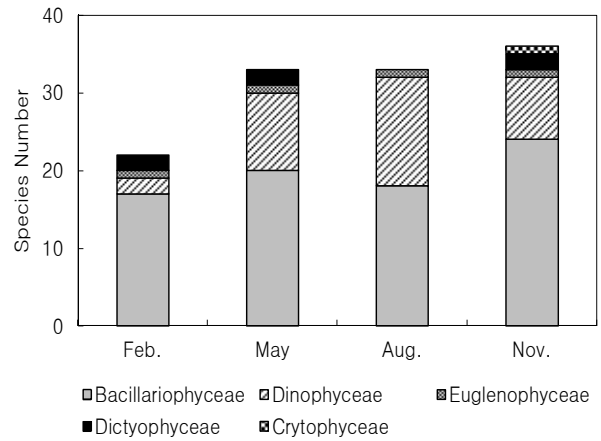


Fig. 4. Seasonal variation of species composition of phytoplankton in the coastal areas of the East Sea in 2009.

주요 분류군인 규조강과 와편모조강의 출현종으로 비교하였을 때 출현종수는 과거 출현종수에 비해 약 1/3 정도에 불과하였다. 이러한 출현종수의 큰 차이는 과거 조사에서 채수 채집과 넷트 채집을 동시에 수행한 반면 본 연구에서는 채수 채집 방법만으로 조사한 결과로서 채집 방법 상의

Table 3. Spatial and temporal variations of dominant species of phytoplankton in the coastal areas of the East Sea in 2009

Stations	February	May	August	November
E01	<i>Pseudo-nitzschia dellicatissima</i>	<i>Chaetoceros affinis</i> <i>Chaetoceros didymus</i>	<i>Prorocentrum micans</i> <i>Prorocentrum triestinum</i>	<i>Cryptomonas</i> sp.
E02	"	"	"	"
E03	"	"	"	"
E04	"	"	"	"
E05	"	"	"	"
E06	"	"	"	"
E07	<i>Eutreptiella gymnastica</i>	"	<i>Leptocylindrus danicus</i> <i>Chaetoceros affinis</i>	"
E08	"	"	"	"
E09	"	"	"	"
E10	<i>Lauderia annulata</i>	"	"	"
E11	"	"	"	"
E12	"	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Chaetoceros affinis</i> <i>Pseudonitzschia pungens</i>	"
E13	"	"	"	<i>Pseudo-nitzschia longissima</i> <i>Thalassionema nitzschioides</i>
E14	"	"	"	"
E15	<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>	"	"	<i>Pseudo-nitzschia dellicatissima</i>
E16	"	"	"	"
E17	"	"	"	"
E18	"	"	"	"

동해 연안 수괴 특성에 따른 식물플랑크톤 우점종의 계절 변동

차이에 기인한 것으로 보인다.

동정된 식물플랑크톤 중 가장 많은 종이 출현한 분류군은 규조강인 *Chaetoceros*속으로 총 7종이 출현하였으며, *Rhizosolenia*속, 와편모강인 *Prorocentrum*속 및 *Protoberidinium*속도 각각 4종, 4종, 5종씩 출현하였다. 과거 동해안의 주요 출현 종과 비교하였을 때 규조강의 종조성은 *Chaetoceros*속이 가장 많은 출현 종수를 보인 것과는 비슷한 경향이었으나, 실제 출현종수에 있어서는 과거 50여종에 비하면 본 연구에서 매우 단순한 종조성을 보였다. 와편모조류의 주요 출현 속은 과거 *Gymnodinium*과 *Ceratium*이었으나(Shim and Lee, 1983; Shim et al., 1985), 본 연구에서는 *Prorocentrum*속과 *Protoberidinium*속으로 주요 종에 있어서 차이를 보였다.

조사기간 중 동해안에 출현한 식물플랑크톤의 출현밀도별 순위를 Fig. 5에 나타내었다.

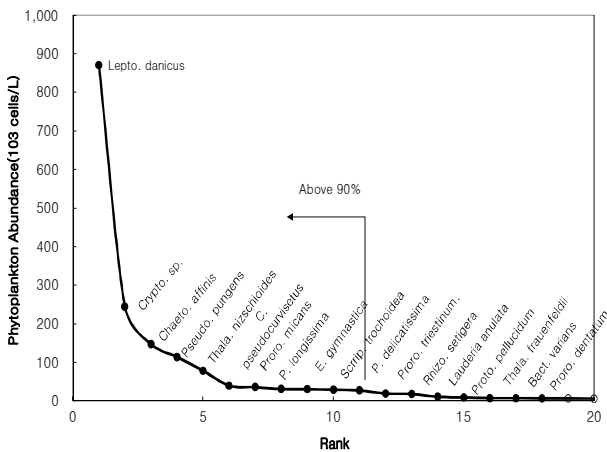


Fig. 5. Rank of phytoplankton abundance in the coastal areas of the East Sea in 2009.

5월에 극우점하면서 높은 출현밀도를 나타낸 *Leptocylindrus danicus*가 연중 870×10^3 cells/L로 점유율이 가장 높았고, 11월에 우점한 *Cryptomonas* sp.가 244×10^3 cells/L, *Chaetoceros affinis*가 147×10^3 cells/L로 뒤를 이었다. 그 외 높은 순위로는 *Pseudonitzschia pungens*, *Thalassionema nitzschioides* 등으로 나타났다. 동해 연안에서 주로 우점하여 출현하는 종은 *Skeletonema costatum*, *Asterionella graciales* 및 *Leptocylindrus danicus* 등 다소 작은 크기의 종이 높은 개체수 분포를 보인다고 알려져 있으며(Lee et al., 1998), 본 연구에서도 연중 가장 높은 점유율을 보인 종은 *Leptocylindrus danicus*로 나타났다.

3.4. 식물플랑크톤과 수질환경과의 상관관계

동해연안 식물플랑크톤 현존량과 수질환경과의 상관관계를 분석하였다(Table 4). 수온은 염분, DO, DIN 및 SiO₂-Si와 모두 음의 상관관계를 보였으며 이중 염분과의 상관관계($r=0.89$, $p < 0.05$)가 가장 높은 것으로 나타났다. 염분은 DO($r=0.57$, $p < 0.01$), DIN($r=0.41$, $p < 0.01$), SiO₂-Si($r=0.49$, $p < 0.01$) 및 투명도($r=0.24$, $p < 0.05$)와 양의 상관관계를 보인 반면 클로로필과($r=0.25$, $p < 0.05$)는 음의 상관관계를 보였다. 동해 남부해역의 식물플랑크톤 현존량은 다른 환경요인보다는 해양물리학적 특성과 관계가 크다고 Lee and Shim(1990)이 보고하였나, 본 연구 결과에서 나타난 수온과 염분은 식물플랑크톤 현존량과 상관이 낮게 나타났다. 생태계 내에서 식물플랑크톤의 군집구조에 영향을 주는 물리·화학, 생물학적인 환경요인은 다양하기 때문에 어느 특정 요인과 정량화하기는 어렵지만 본 연구에서 식물플랑크톤은 pH($r=0.24$, $p < 0.05$), DO($r=0.26$, $p < 0.05$), 부유물질($r=0.25$, $p < 0.05$) 및 클로로필-a($r=0.25$, $p < 0.05$)과 양의 상관관계를 보였다. 특히 식물플랑크톤의 현존량, DO, pH와의 관계는 식물플랑크톤의 증식으로 이산화탄소가 소비되면서 pH가 높아지거나 광합성의 결과 산소가

Table 4. Coefficients of the pearson correlation between phytoplankton and surface water parameters in the coastal areas of the East Sea in 2009

	Temp.	Sal.	pH	DO	DIN	DIP	SiO ₂ -Si	SD	SS	Chl-a	Phyto.
Temp.	1	-0.887**	0.267*	-0.545**	-0.492**	-0.192	-0.720**	-0.178	0.095	0.115	0.179
Sal.		1	-0.220	0.573**	0.406**	-0.007	0.490**	0.240*	0.037	-0.250*	-0.091
pH			1	-0.014	-0.062	0.225	-0.208	-0.187	0.053	0.375**	0.243*
DO				1	0.163	-0.140	0.097	-0.073	0.276*	0.035	0.256*
DIN					1	0.239*	0.652**	0.297*	-0.363**	-0.100	-0.075
DIP						1	0.448**	-0.035	-0.070	0.280*	-0.230
SiO ₂ -Si							1	0.229	-0.321**	-0.033	-0.434**
SD								1	-0.206	-0.444**	-0.183
SS									1	0.174	0.251*
Chl-a										1	0.245*
Phyto.											1

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

발생하는 것과 상관성이 크다(David, 1995; Jung et al., 2012). 영양염과 식물플랑크톤의 현존량과의 상관관계에 관한 연구 중 Lee et al.(1998)의 보고에 따르면 입자태유기질소가 최대일 때 식물플랑크톤 현존량이 높았다고 알려져 있다.

Kang and Choi(2002)의 원진 주변해역 식물플랑크톤에 대한 연구 결과, 울진 해역에서는 여름철 인산염과 높은 역상관 관계를 보였고, 고리 해역에서는 여름철 질산염이 소형 플랑크톤과 역상관 관계를 보였다. 그러나 본 연구결과에서는 영양염 중에서는 SiO₂-Si(r=0.43, p < 0.01)와 식물플랑크톤 현존량이 음의 상관관계를 보였다. 이는 식물플랑크톤의 증식에 따른 SiO₂-Si의 소모로 인한 것으로 보이며, 식물플랑크톤의 성장제한요소로 질산염의 영향을 많이 받는다는 결과와는 다소 다른 결과를 보였다.

3.5 수괴 특성에 따른 식물플랑크톤 우점종 변동

계절별 수온과 염분에 따른 수괴 특성과 식물플랑크톤 우점종 변동을 살펴보았다. 수괴 특성은 Jeong et al.(2013)이 제시한 수괴 분포(Table 5)를 참고하여 정점별 식물플랑크톤 우점종을 T-S도에서 분석한 결과, 우점종 분포는 수온과 염분의 영향을 받는 것으로 나타났다(Fig. 6).

수괴특성에 따른 식물플랑크톤의 군집특성을 보면, 2월의 경우 E1(거진)은 밀도(σ_t) 26.86 σ_t (수온 6.07 $^{\circ}$ C, 염분 34.06)로서 Jeong et al.(2013)이 제시한 북한한류 수괴의 특성에 해당되고, 그 외 정점은 25.87-26.40 σ_t (수온 9.12-12.94 $^{\circ}$ C, 염분 33.93-34.35)로서 대마난류 중층수의 식물플랑크톤 분포특성을 보였다. 이때 식물플랑크톤 우점종은 수온 10 $^{\circ}$ C 전후인 E07(동해) 정점 기준으로 *Pseudo-nitzschia dellicatissima*에서 *Eutreptiella gymnastica*로 우점종이 바뀌었다(Table 3). 5월은 24.82-25.91 σ_t (수온 11.38-17.08 $^{\circ}$ C, 염분 33.84-34.12)의 밀도분포 범위로 식물플랑크톤은 대마난류중층수의 수괴 특성을 나타내었다. 특히 수온 15 $^{\circ}$ C 전후인 E12(후포) 정점 이북에서 우점종은 *Chaetoceros affinis*와 *Chaetoceros didymus*였으나, E12(후포) 정점 이남에서는 우점종이 *Leptocylindrus danicus*로 바뀌면서 현존량 또한 증가하였다. 8월의 식물플랑크톤 군집 특성은 20.24-22.38 σ_t (수온 21.89-25.25 $^{\circ}$ C, 염분 30.54-32.80)의 대마난류표층수의 특성을 보였고, 이때 우점한 식물플랑크톤은 *Prorocentrum micans*와 *Chaetoceros affinis*, *Chaetoceros lorenzianus* 등 대마난류 지표종이었다(Park et al., 1991; Karawada, 1965).

밀도 21-23 σ_t 에서는 *Prorocentrum micans*와 *Prorocentrum triestinum*이, 20-21 σ_t 범위에서는 *Chaetoceros affinis*가 공통적으로 분포하였고, 그 외 *Leptocylindrus danicus*와 *Pseudo-nitzschia pungens*가 지역별로 다르게 출현하였다. 8월은 염분 분포가 연안별 차이를 보여 염분 32를 기준으로 그 이상인 E06(강릉 육계) 이북연안은 *Prorocentrum*이었고, 32 이하인 E07(동해)

Table 5. Distinctive values of temperature and salinity for water masses in Sokcho, Jukyong and Gampo along the eastern coast of Korea(Jeong et al., 2013)

Water mass	Temperature($^{\circ}$ C)	Salinity	Density(σ_t)
TSW	20.0-28.3	31.04-33.75	<23.85
TMW	8.1-16.3	33.00-34.49	24.93-26.27
NKCW	1.8-9.4	33.78-34.42	26.59-27.30

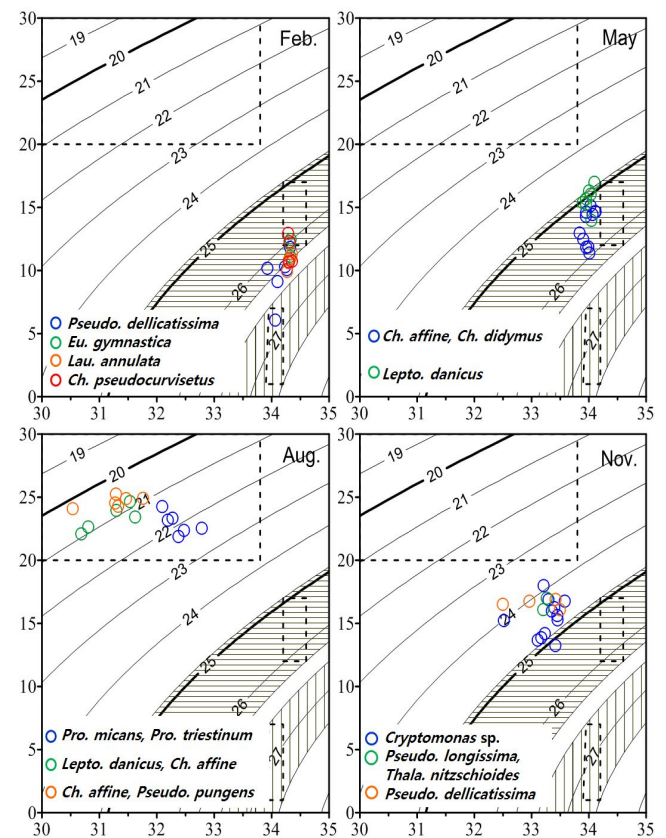


Fig. 6. The distribution of phytoplankton dominant species on the T-S diagram. Water mass by the definition of water temperature and salinity. Tsushima Surface Water(TSW; ...), Tsushima Middle Water(TMW; ▨), and North Korean Cold Water(NKCW; ▨)(Jeong et al., 2013).

이남부터 구조류로 우점종이 바뀌었다. 11월은 대마난류의 영향이 서서히 줄어들면서 북한한류와 대마난류 중층수의 경계역에 분포하고 있으며, 5월과 8월에 비해 수온과 염분에 따른 우점종 변동이 뚜렷하지 않았다. 계절별로 염분에 의한 식물플랑크톤 우점종 변동은 8월에 가장 뚜렷하게 나타났다. Shim and Lee(1987)는 식물플랑크톤과 환경요인의 상관관계를 정준상관분석(Canonical Analysis)으로 분석한 결과 7가지 환경요인 중 수온과 염분이 가장 영향을 많이 미치는

동해 연안 수괴 특성에 따른 식물플랑크톤 우점종의 계절 변동

요인으로 보고하였다. 또한 Lee and Shim(1990)의 연구 결과에 따르면 동해남부해역의 식물플랑크톤의 현존량 분포는 T-S도상에서 계절적으로 순환하며, 봄과 가을에 각각 수온과 염분의 영향을 받는다고 하였다. 본 연구결과에서도 식물플랑크톤 군집은 5월에는 수온의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으나, 염분의 영향은 하계인 8월에 뚜렷하게 받은 것으로 나타나 Lee and Shim(1990)의 연구와 다른 결과를 보였다.

조사기간 중 동해 연안에 출현한 식물플랑크톤 현존량과 종조성을 바탕으로 정점별 유사도를 분석하기 위하여 다원척도분석을 실시한 결과, 조사월에 따른 차이는 있으나 주로 경북 죽변과 울진을 기점으로 강원 연안 그룹(Group A)과 경북 연안 그룹(Group B)으로 나뉘어졌다(Fig. 7).

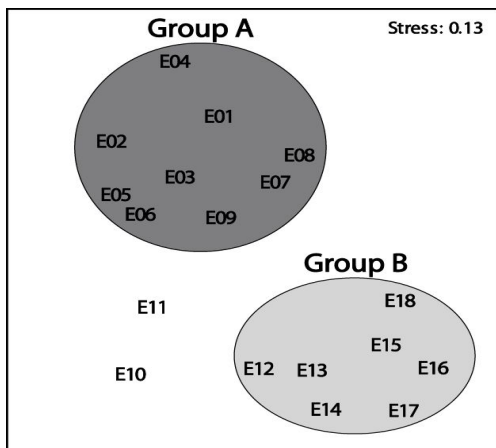


Fig. 7. MDS plot based on Bray-Curtis similarity matrix of fourth root transformed data of species number and abundance in the coastal areas of the East Sea, Korea in 2009.

본 연구결과는 2009년을 대상으로 분석하였지만 Kim et al.(2014b)이 동해연안에서 43년(1971-2013) 동안 연안정지 관측소에서 조사한 표면수온으로 지역별 유사도를 분석한 결과와 잘 일치하였다. 이것은 동해연안의 지역에 따른 식물플랑크톤 현존량과 종조성은 수온과 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 강원 거진에서 경북 감포까지 동해 주요연안 18개 정점에 대해 2009년 2월부터 11월까지 연 4회(2, 5, 8, 11월) 식물플랑크톤의 우점종 변동 특성을 분석하였다. 식물플랑크톤은 규조강(Bacillariophyceae), 와편모조강(Dinophyceae),

유글레나조강(Euglenophyceae), 규질편모조강(Dictyophyceae) 및 은편모조강(Cryptophyceae) 총 5개 분류군이 출현하였으며, 연중 가장 높은 점유율을 보인 종은 *Leptocylindrus danicus*로 나타났다. 현존량은 1.2×10^3 - 246.6×10^3 cells/L(평균 24.8×10^3 cells/L) 분포로 정점별, 월별 개체수의 지역별 분포 차이가 매우 크게 나타났으며 강원연안에 비해서 경북연안에서 다소 높았다.

해양환경과 요인과의 식물플랑크톤 현존량과의 상관관계는 pH, DO, 부유물질 및 Chl-a와 양의 상관관계를 보인 반면 SiO₂-Si와는 음의 상관관계를 보였다. 계절에 따른 식물플랑크톤 우점종을 등밀도선상의 T-S도에서 분석하였을 때, 우점종 분포는 수온과 염분의 영향을 다소 받는 것으로 나타났으며, 특히 5월은 수온, 8월은 염분에 따른 우점종 변화가 뚜렷하게 나타났다. 식물플랑크톤 현존량과 종조성을 바탕으로 다원척도분석을 실시한 결과 조사월에 따른 차이는 다소 있으나 주로 경북 죽변과 울진을 기점으로 강원 연안 그룹과 경북 연안 그룹으로 나뉘어졌으며, 이러한 결과는 표면수온의 지역별 유사도를 분석한 결과와 잘 일치하였다. 따라서 동해연안의 지역에 따른 식물플랑크톤 군집 변동은 여러 가지 환경요인 중 수온과 염분의 분포와 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서의 연 단위 식물플랑크톤 군집 변동 특성이 동해안의 수온 상승과 장기간의 식물플랑크톤 군집 변동과의 관계를 보다 면밀하게 분석할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 본다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원 “적조 모니터링 및 발생 메커니즘 연구(과제번호: R2015047)”의 일환으로 수행되었으며, 현장 조사 및 분석에 협조해 주신 탐구 12호 승무원 및 과제 관련 연구원들께 감사드립니다.

References

- [1] Bray, J. R. and J. T. Curtis(1957), An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. Ecological Monographs, Vol. 27, pp. 325-349.
- [2] Buzz, F.(2002), Phytoplankton assemblages in two subbasins of lake como, Journal of Limnology, Vol. 61, pp. 117-128.
- [3] Cho, C. H.(1985), Chlorophyll-a concentrations of microplankton and nannoplankton in the coastal seas of Korea in fall, Journal of Korean Fisheries Society, Vol. 18, No. 1, pp. 63-66.
- [4] Choi, H. C., Y. S. Kang and I. S. Jeon(2004a), Phytoplankton

- community in adjacent waters of Ulchin nuclear power plant, *Journal of Korean Environmental Biology*, Vol. 22, pp. 426-437.
- [5] Choi, H. C., Y. S. Kang, K. Choi, T. Y. Song and M. H. Yoo(2004b), Analysis on the pigment composition of phytoplankton assemblages using HPLC(High Performance Liquid Chromatography) in the adjacent waters of nuclear power plants in spring. *Journal of Korean Society of Oceanography*, Vol. 39, pp. 234-242.
- [6] David, H. M.(1995), *Marine life and the sea*, Wadsworth publishing company, pp. 51-79.
- [7] Jang, P. G., H. H. Shin, S. H. Baek, M. C. Jang, T. S. Lee and K. Shin(2013), Nutrient distribution and effects on phytoplankton assemblages in the western Korea/Tsushima Strait, *New Zealand Journal of Marine Freshwater Research*, Vol. 47, No. 1, pp. 21-37.
- [8] Jeong, H. D., S. W. Kim, K. Y. Kwon, J. W. Lim and C. H. Kwoun(2013), Oceanographic features around aquaculture areas of the eastern coast of Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety Research*, Vol. 19, No. 4, pp. 334-344.
- [9] Jung, S. W., J. K. Park, D. H. Jeong and D. I. Lim(2012), Seasonal changes in water masses and phytoplankton communities in the western part of south coastal waters, Korea, *Journal of Korean Environmental Biology*, Vol. 30, No. 4, pp. 328-338.
- [10] Kang, Y. S. and J. G. Choi(2002), Ecological characteristics of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori, Wolseong, Uljin and Younggwang II. Distributions of standing crops and environmental variables(1992~1996), *Journal of Korean Society of Oceanography*, Vol. 7, No 3, pp. 108-128.
- [11] Kang, Y. S., H. C. Choi, J. H. Lim, I. S. Jeon and J. H. Seo(2005), Dynamics of the phytoplankton community in the coastal waters of Chuksan harbor, East Sea, *Algae*, Vol. 20, pp. 345-352.
- [12] Karawada, M.(1965), Diatoms in the Kuroshio waters neighboring Japan, *Inform. Bull. Plankton Japan*, Vol. 12, pp. 8-16.
- [13] Kim, S. W., S. Saitoh, J. Ishizaka, Y. Isoda and M. Kishino (2000), Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentrations in the Japan Sea derived from CZCS images, *Journal of Oceanography*, Vol. 56, pp. 527-538.
- [14] Kim, S. W., S. Saitoh and D. S. Kim(2002), Spatial distribution of pigment concentration around the east korean warm current region derived from satellite data-satellite observation in May 1980, *Journal of Korean Society of Oceanography*, Vol. 35, No. 3, pp. 265-272.
- [15] Kim, S. W., Y. Isoda and T. Azumaya(2003), Seasonal variation of phytoplankton in the East Sea using a surface mixed layer ecosystem model, *Journal of Korean Fisheries Society*, Vol. 36, No. 2, pp. 178-186.
- [16] Kim, A. R., S. H. Youn, M. H. Chung, S. C. Yoon and C. H. Moon(2014a), The influences of coastal upwelling on phytoplankton community in the southern part of East Sea, Korea, *Journal of Korean Society of Oceanography*, Vol. 19, No. 4, pp. 287-301.
- [17] Kim, S. W., J. W. Im, B. S. Yoon, H. D. Jeong and S. H. Jang(2014b), Long-term variations of the sea surface temperature in the east coast of Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 601-608.
- [18] 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 the seomjin river estuary, *The Sea. Journal of Korean Society of Oceanography*, Vol. 6, No. 2, pp. 93-102.
- [19] Lee, J. U. and M. Chang(2014), Size dependent analysis of phytoplankton community structure during low water temperature periods in the coastal waters of East Sea, Korea, *Journal of Korean Environmental Biology*, Vol. 32, No. 3, pp. 168-175 .
- [20] Lee, J. B., M. S. Han and H. S. Yang(1998), The ecosystem of the southern coastal waters of the East Sea, Korea, (I) Phytoplankton community structure and primary productivity in September, 1994, *Journal of Korean Fisheries Society*, Vol. 31, No. 1, pp. 45-55.
- [21] Lee, W. H. and J. H. Shim(1990), Distribution of phytoplankton standing crop and the associated T-S properties in the southwestern East Sea(Sea of Japan), *Journal of Korean Society of Oceanography*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-7.
- [22] Matoda, S. and R. Marymo(1963), Plankton of the Kuroshio water, *Proceedings of Symposium on the Kuroshio*, pp. 40-61.
- [23] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2010), *Standard Method of Oceanic Environment*, pp. 3-495.
- [24] Moon, C. H. and H. J. Choi(1991), Studies on environmental characteristics and phytoplankton community the nakdong river estuary, *Journal of Korean Society of Oceanography*, Vol. 26, No. 2, pp. 144-154.

- [25] Oh, H. J., Y. S. Suh and S. Heo(2004), The relationship between phytoplankton distribution and environmental conditions of the upwelling cold water in the eastern coast of the Korean peninsula, Korean Association of Geographic Information Studies, Vol. 7, pp. 166-173.
- [26] Oh, H. J., S. H. Kim and S. Y. Moon(2008), The characteristics of phytoplankton community of cold water in the around sea of Wando in summer, 2005, Journal of Environmental Science, Vol. 17, pp. 949-956.
- [27] Park, J. S., C. K. Kang and K. H. An(1991), Community structure and spatial distribution of phytoplankton in the polar front region off the east coast of Korea in summer, Bulletin of Korean Fisheries Society, Vol. 24, No. 4, pp. 237-247.
- [28] Rey, P. A., J. C. Taylor, A. Laas, L. Rensburg and A. Vosloo(2004), Determining the possible application value of diatoms as indicators of general water quality: a comparison with SASS 5. Water SA., Vol. 30, pp. 325-332.
- [29] Sverdrup, H. U.(1953), On conditions for the vernal blooming of phytoplankton, J. Cons. Cons. Int. Explor. Mer., 18, pp. 287-295.
- [30] Shim, J. H. and W. H. Lee(1983), Plankton study in the southeastern sea of Korea, (I) Phytoplankton distribution in September, 1981, Journal of Korean Society of Oceanography, Vol. 18, No. 2, pp. 91-103.
- [31] Shim, J. H., W. H. Lee and S. Y. Bak(1985), Studies on the plankton in the southwestern waters of the East Sea(Sea of Japan), (II) Phytoplankton-standing crop, nanofraction, and primary production, Journal of Korean Society of Oceanography, Vol. 20, No. 3, pp. 37-54.
- [32] Shim, J. H. and W. H. Lee.(1987), Distribution of phytoplankton species and associated environmental factors in the southwestern waters of the East Sea(Sea of Japan), Korea: A canonical correlation analysis, Journal of Korean Society of Oceanography, Vol. 22, No. 1, pp. 34-42.
- [33] Shim, J. H., H. G. Yeo and J. G. Park(1992), Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea, (I) Biomass and productivity, Journal of Korean Society of Oceanography, Vol. 27, No. 2, pp. 91-100.
- [34] Shim, J. H.(1994), Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea. Marine Phytoplankton. Ministry of Education Republic of Korea, Vol. 34, p. 487.
- [35] Shim, J. H., H. G. Yeo and J. G. Park(1995), Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea, (II) The structure of phytoplankton community, Journal of Korean Society of Oceanography, Vol. 30, No. 3, pp. 163-169.
- [36] Thomas, C. R.(1997), Identifying marine phytoplankton, Florida Marine Research Institute, St. Petersburg, Academic Press, p. 858.
- [37] Yamada, K., J. Ishizaka, S. J. Yoo, H. C. Kim and S. Chiba(2004), Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES), Progress in Oceanography, Vol. 61, pp. 193-211.
- [38] Yoo, S. J. and H. C. Kim(2004), Suppression and enhancement of the spring bloom in the southwestern East Sea/Japan Sea, Deep Sea Research II, Vol. 51, No. 10-11, pp. 1093-1111.

Received : 2015. 09. 01.

Revised : 2015. 10. 05. (1st)

: 2015. 10. 22. (2nd)

Accepted : 2015. 10. 27.