

남해동부연안항만에서 하계 단주기 조사에 따른 해양환경 및 식물플랑크톤 군집조성의 변화

이민지* · 백승호**†

*, ** 한국해양과학기술원 남해특성연구센터

Changes in Marine Environmental Factors and Phytoplankton Community Composition Observed via Short-Term Investigation in a Harbor in the Eastern Part of the South Sea of Korea

Minji Lee* · Seung Ho Baek***

*, ** South Sea Environment Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Geoje 53201, Korea

요약 : 본 연구는 남해동부 연안 해역에서 환경요인과 식물플랑크톤 군집특성 및 *Cochlodinium polykrikoides*의 초기 발생이 내만에서 일어날 수 있는 가능성을 파악하기 위하여 17개의 정점에서 2016년 하계 7월6일에서 8월 24일 동안 2주 간격으로 단기집중조사를 수행하였다. 수온은 7월 6일 조사 시 22.3 ± 2.69 °C에서 8월 24일 조사 시 28.4 ± 0.78 °C로 1차 대비 약 6.01 °C 상승하였고, 염분은 내측 정점 8-13에서 상대적으로 일정하게 높게 나타났다. 7월 6일 조사에서 약 150 mm(10일 누적)에 달하는 강우가 관찰되어 영양염이 높게 공급되었고, 이로 인해 높은 Chl. a가 높게 관찰되었다. 종조성은 은편모조류가 평균 58.3%(*Cryptomonas* spp.)로 극우점하였고, 특이적으로 정점 5에서 와편모조류 *Prorocentrum* spp.(주로 *P. triestrium*)가 32.2%로 극히 높은 비율을 차지하였다. 7월 20일 조사에서 대부분 규조류 *Chaetoceros* spp.가 61.0%를 점유하였다. 정점 4에서 *Skeletonema* spp.가 7.44×10^6 cell L⁻¹로 높은 개체수를 보였으나, 다른 정점에서는 출현하지 않거나 낮게 관찰되었다. 8월 4일 조사와 8월 24일 조사에서 평균 식물플랑크톤 개체수는 매우 낮았으며, 우점종은 8월 4일 조사에서 규조류가 78.0%(*Chaetoceros* spp.)로 높게 나타났고, 8월 24일 조사에서도 규조류가 73.3%(*Pseudo-nitzschia* spp., *Rhizosolenia* spp.)로 높은 점유율을 보였다. 본 연구에서 *C. polykrikoides*의 출현은 관찰되지 않아, 연안 내만 및 항구에서 휴면포자에 의한 유영세포 유입의 가능성은 낮을 것으로 사료되었다. 또한 동해남부해역에서의 반폐쇄적인 내만 특성으로 염분과 영양염류와 같은 환경특성이 각 정점별 명확한 차이를 보였고, 이로 인해 식물플랑크톤 우점종 및 군집조성이 시공간적으로 매우 다르게 나타났다.

핵심용어 : 식물플랑크톤, 군집조성, 하계 단주기 조사, 연안 해역, 해양환경

Abstract : To understand the relationship between environmental factors and phytoplankton community structures and why early outbreaks of *Cochlodinium polykrikoides* occur in the inner bay of Korea, short-term investigations were conducted at 17 stations in the eastern part of the South Sea of Korea, with sessions every two weeks from July 7 to August 24, 2016. The water temperature increased from 22.3 °C in the first survey to 28.4 °C in the fourth survey, which was a rise of about 6.01 °C. Salinity was relatively high at Stns. 8 - 13 in the inner bay. In the first survey, rainfall of about 150 mm was observed, so nutrients were supplied at a high level and a high concentrate of Chl. a was observed. Cryptophyta (*Cryptomonas* spp.) represented 58.3% of the community, followed by Bacillariophyta at 33.8%. In particular, at Stn. 5, Dinophyta *Prorocentrum* spp. accounted for a very high percentage, 32.2%. In the second survey, low phytoplankton populations were observed, and Bacillariophyta (*Chaetoceros* spp.) accounted for 61.0%. At Stn. 4, *Skeletonema* spp. showed high populations but did not appear at other stations even at a low density. In the third and fourth surveys, phytoplankton populations were very low. Bacillariophyta represented 78.0% in the third study and 73.3% in the fourth. Interestingly, although the appearance of *C. polykrikoides* was investigated at the beginning of the red tide in the coastal area, they were not observed inshore, implying that the likelihood of inflow by the germination of resting cysts was low for the inner bay during this study period. In addition, environmental characteristics such as salinity and nutrient presence were significantly different between sampling stations due to the existence of a semi-closed bay in the southern sea, resulting in dominant phytoplankton species and community composition differing in these short-term investigations.

Key Words : Phytoplankton, Phytoplankton Composition, Short-term investigation, Coastal area, Marine environment

* First Author : mjlee@kiost.ac.kr, 055-639-8526

† Corresponding Author : baeksh@kiost.ac.kr, 055-639-8513

1. 서론

식물플랑크톤은 일차생산자로서 해양 먹이 피라미드의 출발점에 있고, 그들의 성장은 수온, 염분, 광량, 광주기, 영양염류 등과 같은 무생물학적 환경요인과 더불어 중간 경쟁, 상위영양단계 생물의 포식, 박테리아의 감염 등과 같은 생물학적 요인에 의하여 크게 영향을 받는다(Thompson et al., 2008; Guinder et al., 2013). 특히 식물플랑크톤의 군집조성과 생체량은 시기 및 공간에 따라 다양하게 변화하며, 이러한 변화는 특정해역의 환경인자를 추적함으로써 일정부분 그들의 증식 양상을 해석할 수 있다. 따라서 연안 해역 1차 생산의 변화양상은 해양환경 평가 및 식물플랑크톤의 군집조성을 파악하는 것이 중요하다고 하겠다. 일반적으로 온난해역에서 식물플랑크톤의 대증식은 춘계와 추계에 유광층 주변의 풍부한 영양염류의 공급으로 발생하는 경향이 강하다. 하지만, 우리나라는 하계에도 불구하고, 몬순기후의 영향으로 6-7월의 장마철에 강우가 집중되고, 8-9월에는 산발적으로 접근하는 태풍에 의한 강우의 영향으로, 육상기원의 영양염류가 연안 해역으로 대량 유입되어 식물플랑크톤 대증식을 유도하고, 이는 하계의 1차 생산에 중요한 역할을 한다(Hallegraeff et al., 2003).

남해동부해역에서는 하계 외해로부터 유입되는 고온의 대마난류, 중국양자강기원의 저염분수괴, 낙동강, 섬진강의 유입과 더불어 다른 중소하천의 담수로부터 육상기원의 영양염류가 대량 유입될 수 있는 해역환경특성을 지니고 있다. 아울러, 남해동부해역은 수산업이 발달한 지역으로 이때 패류양식장과 더불어 어류양식장이 밀집되어 유기/무기물이 높은 밀도로 용출되기 쉬운 환경이다. 특히 남해동부연안의 내만 및 항구는 해역은 수심이 얕고, 해수 순환이 원활하지 않은 특성이 있다(Lee et al., 1997). 반면 거제도 주변해역에서는 하계 남풍계열의 바람의 우점으로 용승이 빈번하게 관찰되고 있고(Park, 1978), 이는 국부적으로 내만 및 항구에도 영향을 미치기 때문에 부유생물 생태계에 지대한 변화를 초래할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 내만 환경요인이 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 통계적으로 해석하고자, 남해동부 연안 항만을 중심으로 2016년 7, 8월 2개월 동안 2주 간격으로 단기집중조사를 하였다. 이와 같은 연구는 적조 발생 전 단계 연안 내만에서 식물플랑크톤의 군집구조를 이해하는데 중요한 기초자료로 활용 가능할 것이다.

2. 재료 및 방법

현장조사는 남해동부 연안 해역 2016년 하계 남해 동부

연안 17개의 정점에서 4회 (7월 6일; 7월 20일; 8월 4일; 8월 24일)에 걸쳐 수행되었고, 7월 6일 조사에서만 정점 1~11까지 조사가 수행되었다(Fig. 1).

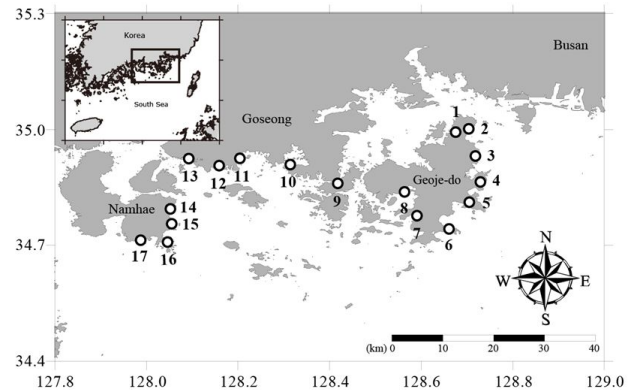


Fig. 1. Map of study area and sampling stations.

YSI-6600을 이용하여 전 수층의 수온, 염분, pH, 용존 산소를 측정하였다. Chl. *a* 측정을 위해 Whatman GF/F glass fiber filters (a 47-mm diameter; pore size 0.45 μm)를 이용하여 표층수를 여과하였고, 여과지는 15 ml 튜브에 넣어 분석 전까지 -20°C 에서 냉동 보관하였으며, 이후 냉동 보관한 여과지를 90% Acetone에 넣어 냉암소에서 24시간 동안 색소를 추출한 후 형광측정기(Turner BioSystems, Sunnyvale, CA, USA)를 이용하여 분석하였다(Parsons et al., 1984). 영양염 분석을 위해 Whatman GF/F glass fiber filters를 이용하여 여과한 해수를 PE 병에 넣고 소량의 HgCl_2 를 첨가한 후 냉동 보관하였다(Kattner, 1999). 냉동 보관한 영양염은 분석 전 해동하여 Nitrate + Nitrite, Ammonium, Phosphate, Silicate를 Parsons et al. (1984)의 분석법에 따라 영양염 자동분석기(Autoanalyzer QuikChem 8000; Lachat Instruments, Loveland, CO, USA)를 이용하여 분석하였고, 영양염 농도는 표준시약인 Brine solution (CSK Standard Solutions; Wako Pure Chemical Industries, Osaka, Japan)을 이용하여 보정하였다. 식물플랑크톤 종조성과 정량 분석을 하기 위해 500 mL의 표층수를 루골을 이용하여 최종 농도 0.5%가 되게 고정하였다. 이후 500 mL의 샘플을 50 mL로 농축시킨 후 Sedgewick-Rafter counting chamber에 샘플을 100~300 μL 분주하여 200배 혹은 400배 배율로 동정 및 계수하였다. 정점별 식물플랑크톤의 군집구조를 자세히 알아보기 위해서 각 정점에 출현한 식물플랑크톤을 바탕으로 Bray-Curtis 유의도를 산출하였고, PRIMER version 5를 이용해 Cluster 분석을 실시하였으며, 식물플랑크톤 군집조성과 환경인자 사이에 어떠한 관계가 있는지 CANOCO 4.5 software를 이용하여 CCA(Canonical Correspondence Analysis) 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

2016년 남해 동부 연안의 수온 및 염분 변화를 Figure 2와 3에 나타내었다. 7월 6일 조사의 평균 수온은 22.3 °C (±2.69 °C)로 가장 낮았으며, 7월 20일 조사의 표층 평균 수온은 24.5 °C (±2.00 °C), 8월 4일 조사에서는 25.7 °C (± 2.07 °C), 8월 24일 조사는 28.4 °C (±0.78 °C)로 나타났다. 조사 시기 모두 상대적으로 외양수의 영향이 적은 정점 8~13에서 비교적 빠르게 수온 상승이 이루어졌다. 8월 24일의 표층 평균 수온은 7월 초 조사보다 약 6.01 °C로 크게 급상승하였다. 특히 수온이 전반적으로 높았던 8월은 정점 간의 수온 편차도 가장 적었으며, 표층과 저층의 수온 차이도 0.01 °C로 낮았고, 모든 해역에서 일정하게 고수온의 특성을 보였다. 2016년 하계는 특이적으로 기록적인 폭염과 양쯔강 희석수의 영향으로 남해 연근해 전 해역에서 고수온 저염분수가 관측되었다(Park et al., 2011; Choi et al., 2016; Yoo et al., 2017). 또한 이러한 고수온은 2016년 통영연안의 양식장주변에서 수산물 피해를 야기하였다(http://www.knn.co.kr/103376). 표층 염분의 경우 7월 6일 조사에서 강우의 영향으로 평균 27.9 (±6.31)이었으며, 담수의 영향을 직접적으로 받은 8번 정점은 11.1로 가장 낮은 염분을 보였다.

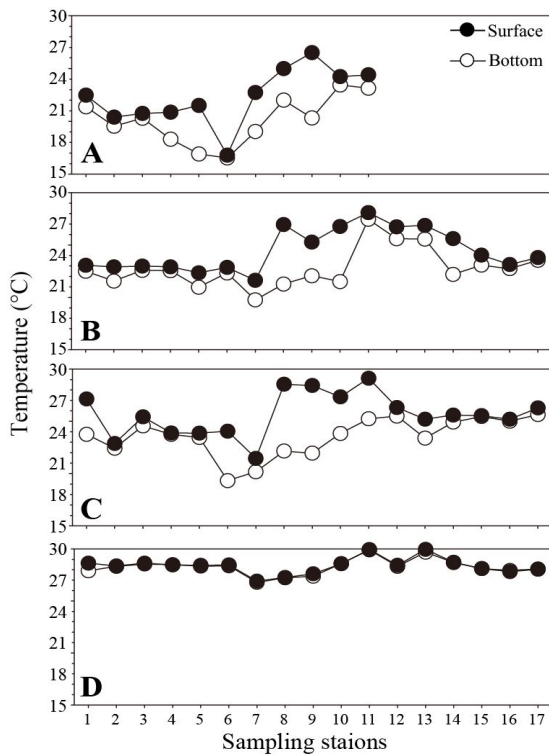


Fig. 2. Changes in temperature of surface and bottom water (A: July 7; B: July 20; C: August 4; D: August 24).

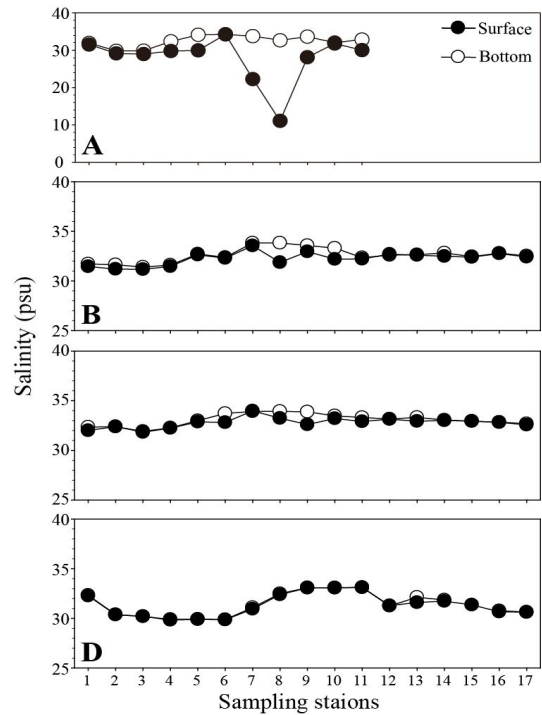


Fig. 3. Changes in salinity of surface and bottom water (A: July 7; B: July 20; C: August 4; D: August 24).

기상청 강수량 자료에 따르면 7월 6일 조사 전 10일간의 누적 강수량이 남해 기준 154 mm, 통영 기준 162 mm으로 나타났다. 그 결과 조사해역의 표층염분은 강우의 영향으로 대부분 정점에서 상대적으로 낮게 나타났다. 특히 정점 7과 8에서 염분이 크게 하락하였다(Fig. 4). 7월 20일 조사와 8월 4일 조사에서의 표층염분은 평균 32.3 (±0.65), 32.8 (±0.51)이었고, 8월 24일 조사에서는 평균 31.3 (±1.16)으로 상대적으로 8월 24일 조사에서 낮은 염분을 보였고, 이 때 남해와 통영은 조사 전 10일 간의 강우가 없었지만 부산지역은 76.0 mm의 강우가 있었던 것으로 보아 이는 거제도 동쪽 연안 정점(정점 2~6)이 낙동강 유출수의 영향을 크게 받았기 때문으로 사료된다. 수온과 마찬가지로 외양수의 영향이 적은 정점 8~13에서 상대적으로 일정하게 높은 염분을 유지하는 것을 확인하였다.

남해 동부 연안 표층 영양염 농도의 조사 시기 별 정점 간 수평적 분포양상을 Figure 5에 나타내었다. 7월 6일 조사 시 Nitrate + Nitrite의 평균 농도는 16.1 μM (±16.5 μM), 7월 20일 조사 시 평균 0.76 μM (±0.93 μM), 8월 4일 조사 시 평균 1.33 μM (±1.68 μM), 8월 24일 조사 시 평균 1.06 μM (±1.13 μM)으로 나타났다. 다른 조사 시기에 비하여 7월 6일 조사에서 평균 15배 이상 매우 높은 Nitrate + Nitrite 농도를 보였으며, 수평적 분포를 보면 내만 항구에 위치한 정점 9에서 전반적

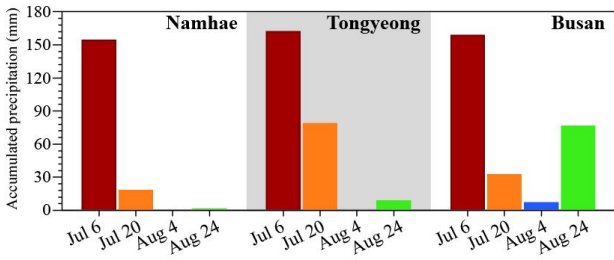


Fig. 4. Accumulated precipitation of 10 days before each sampling.

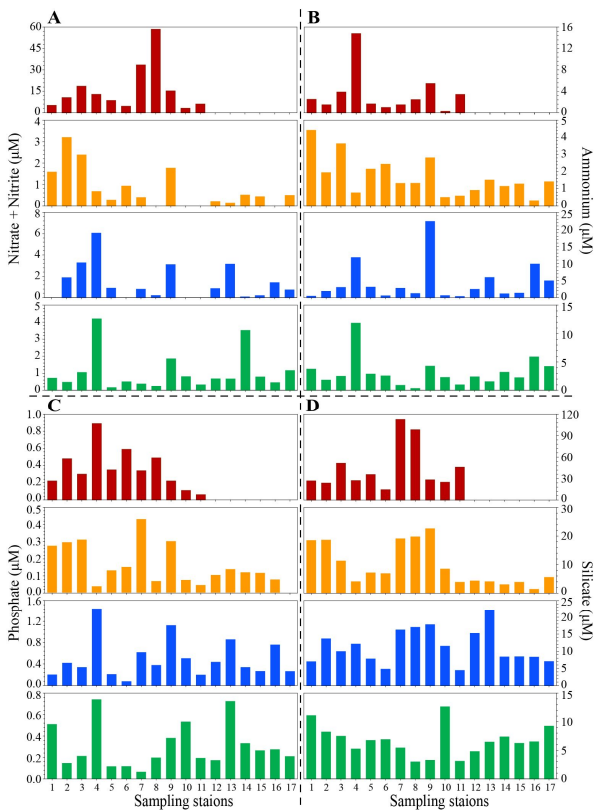


Fig. 5. Distribution of nutrients at sampling stations (A: July 7; B: July 20; C: August 4; D: August 24).

으로 높은 농도를 보였다. 이 시기 강우의 영향으로 염분도 함께 하락하였으며, 조사 지역이 모두 연안 항구에 집중되어 있어 강우로 인한 담수의 유입으로 인해 Nitrate + Nitrite의 농도가 크게 증가했다. 이와 같은 육상으로부터의 질산염 공급은 이미 많은 연구로부터 보고되고 있다(kwon et al., 2001; Jang et al., 2005). 8월 24일 조사 역시 낙동강 하구역과 거제 동부 연안에 담수가 희석되어 염분이 소폭 하락하였지만 영양염은 크게 증가하지 않았다. 이는 강우량이 높지 않아, 낙동강으로부터 유출된 영양염이 거제 동부에 도달하기 전에 이미 대부분 소진되었을 가능성이 높다. 영양염을 표층 Ammonium 농도는 7월 6일 조사 시 평균 $3.49 \mu\text{M} (\pm 4.02 \mu\text{M})$,

7월 20일 조사 시 평균 $1.67 \mu\text{M} (\pm 1.12 \mu\text{M})$ 로 나타났으며, 8월 4일 조사 시 평균 $4.34 \mu\text{M} (\pm 5.69 \mu\text{M})$, 8월 24일 조사 시 $3.14 \mu\text{M} (\pm 2.63 \mu\text{M})$ 으로 나타났다. 7월 20일 조사 시 Ammonium 농도가 상대적으로 낮았으나, 조사시기에 따른 차이는 그다지 크지 않았다. 인위적인 영향을 강하게 받는 장승포항 정점 4(7월 20일 조사 제외)와 통영항 정점 9에서 지속적으로 높은 Ammonium 농도가 관찰되었고, 이는 암모니아와 같은 영양염류는 도시 오폐수와 인간 활동의 영향에 의한 것으로 판단된다. 표층 Phosphate의 평균 농도는 7월 6일 조사에서 $0.34 \mu\text{M} (\pm 0.24 \mu\text{M})$, 7월 20일 조사 시 평균 $0.16 \mu\text{M} (\pm 0.11 \mu\text{M})$, 8월 4일 조사 시 평균 $0.49 \mu\text{M} (\pm 0.36 \mu\text{M})$, 8월 24일 조사 시 평균 $0.30 \mu\text{M} (\pm 0.21 \mu\text{M})$ 으로 전 조사에서 낮은 Phosphate 농도를 보였다. 정점 간의 경향은 Ammonium의 경향과 동일하게 정점 4와 9에서 전반적으로 높았으며, 특히적으로 7월 20일 조사에서 정점 4의 Ammonium과 Phosphate의 농도가 낮은 값을 보였다. Silicate 농도는 7월 6일 조사에서 평균 $44.7 \mu\text{M} (\pm 32.1 \mu\text{M})$ 의 농도를 보였으며, 7월 20일 조사에서는 평균 $9.55 \mu\text{M} (\pm 7.18 \mu\text{M})$, 8월 4일 조사에서는 평균 $11.3 \mu\text{M} (\pm 5.04 \mu\text{M})$, 8월 24일 조사에서는 평균 $6.68 \mu\text{M} (\pm 2.63 \mu\text{M})$ 로 강우의 영향을 받은 7월 6일 조사를 제외하고 낮은 Silicate 농도를 보였다. 이러한 결과는 2006년 비슷한 지역에서 수행되었던 Lim et al.(2006)의 결과와 유사하였다. 연안 지역임에도 불구하고 장마시기인 7월 중순 평균 $21 \mu\text{M}$ 의 농도를 보인 것을 제외하고, 7월 초와 8월 말 매우 낮은 규산염 농도를 보였다. 이는 본 해역에서 주로 우점하는 식물플랑크톤인 규조류의 성장의 영향을 받은 것으로 사료된다.

조사 시기 별 표층에서 총 Chl. a의 수평 분포 결과를 Figure 6에 나타내었다. 총 Chl. a의 양은 7월 6일 조사에서 평균 $5.71 \mu\text{g L}^{-1} (\pm 3.76 \mu\text{g L}^{-1})$ 로 조사 중 가장 높았다. 우리나라는 주로 몬순의 영향을 받아 7월 장마기간 동안 강우에 의한 다량의 육상기원의 영양염이 연안으로 유입되어 식물플랑크톤이 대량으로 성장하게 된다(Lee et al., 1994; Kang et al., 1999). 본 연구에서도 7월 6일 조사에서 약 160 mm(10일 누적)에 달하는 강우가 관찰되어 영양염이 높게 공급되었고, 이로 인해 식물플랑크톤이 비교적 대량으로 증식한 것으로 확인되었다. 7월 20일 조사에서는 평균 $2.74 \mu\text{g L}^{-1} (\pm 2.06 \mu\text{g L}^{-1})$, 8월 4일 조사와 8월 24일 조사에서는 각각 평균 $2.00 \mu\text{g L}^{-1} (\pm 1.19 \mu\text{g L}^{-1})$, 평균 $1.57 \mu\text{g L}^{-1} (\pm 1.35 \mu\text{g L}^{-1})$ 의 농도를 보여 7월 6일 조사에 비해 낮은 농도를 보였으며, 그 농도 역시 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 정점 간의 엽록소 농도를 비교해보면 정점 4에서 꾸준히 높은 엽록소 농도를 보였고, 앞서 언급한 정점 8~13에서 비교적 일정하게 높은 값을 유지하였다. 남해 동부 연안 표층에서 관찰된 식물플랑크톤의 총 개체수와 각 분류군별 점유율을 Figure 7에 나타내었

남해동부연안항만에서 하계 단주기 조사에 따른 해양환경 및 식물플랑크톤 군집조성의 변화

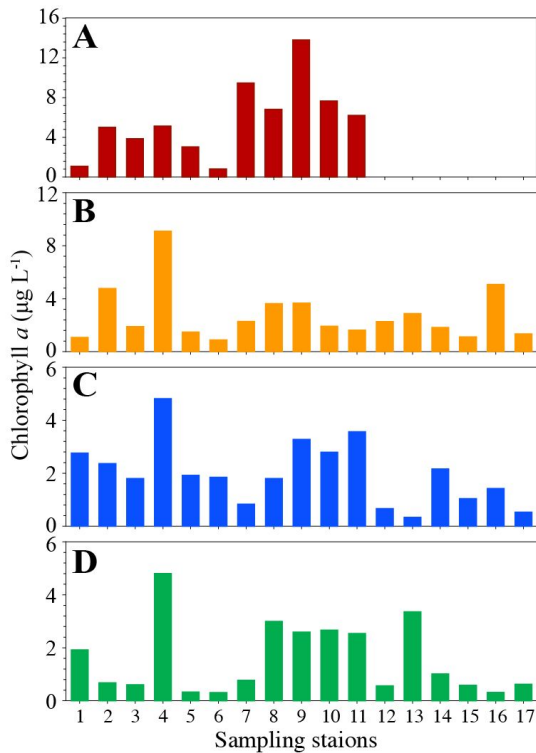


Fig. 6. Distribution of Chlorophyll *a* at each stations. (A: July 7; B: July 20; C: August 4; D: August 24)

다. 7월 6일 조사의 식물플랑크톤 개체수는 평균 1.87×10^6 cell L^{-1} 이었으며, 은편모그룹이 평균 58.3%로 가장 높은 비율을 차지하였고, 우점종은 *Cryptomonas* spp.로 그 중에서 특히 정점 9에서 2.94×10^6 cell L^{-1} 로 극 우점하였다. 다음으로 규조류가 33.8% 비율을 차지하였으며, 특이적으로 정점 5에서 와편모조류가 32.2%로 극히 높은 비율을 차지했다. 이때 우점종은 *Prorocentrum* spp. (0.55×10^6 cell L^{-1})로 나타났다. 7월 20일 조사에서는 정점 4에서 7.44×10^6 cell L^{-1} 로 극히 높았지만 다른 정점에서 비교적 낮은 개체수를 보여 평균 개체수는 0.90×10^6 cell L^{-1} 로 낮은 값을 보였다. 규조류 점유율이 평균 61.0%로 가장 높았으며, 그중 *Chaetoceros* spp.가 가장 높은 개체수를 보였다. 다음으로 은편모조류가 31.6%로 점유하였다. 8월 4일 조사에서는 평균 0.54×10^6 cell L^{-1} , 8월 24일 조사에서는 평균 0.53×10^6 cell L^{-1} 로 유사하게 매우 낮은 개체수를 보였다. 8월 4일 조사와 8월 24일 조사에서는 규조류가 각각 78.0%, 73.3%로 가장 높은 점유율을 보였고, 은편모조류가 각각 13.4%, 12.5%의 점유율을 보였다. 규조류 중에서도 8월 4일 조사에서는 전반적으로 *Chaetoceros* spp.가 우점종이었으며, 8월 24일 조사에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 정점 4와 정점 13에서 각각 1.45×10^6 cell L^{-1} , 1.80×10^6 cell L^{-1} 로 높은 개체수를 보였다. 정점 9와 정점 11에서는

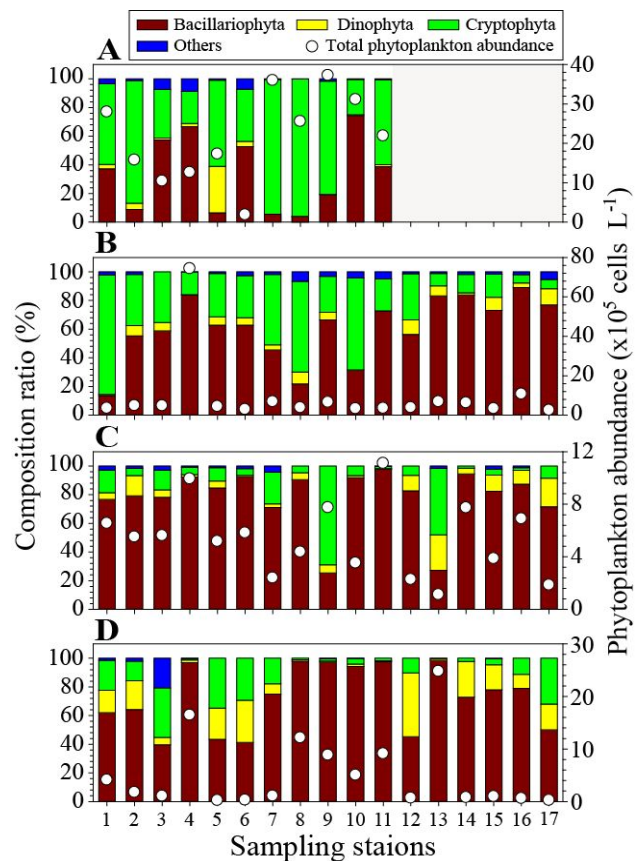


Fig. 7. Total phytoplankton abundance and their relative contribution. (A: July 7; B: July 20; C: August 4; D: August 24)

Rhizosolenia spp.가 각각 0.55×10^6 cell L^{-1} , 0.68×10^6 cell L^{-1} 로 부분적으로 높은 개체수를 보였다.

조사기간 중 정점별 출현한 식물플랑크톤 중 우점해서 나타난 종을 중심으로 6종을 선정 후 Figure 8에 나타내었다. 전 조사에서 *Chaetoceros* spp. (*Chaetoceros pseudocurvisetus*, *Chaetoceros lorenzianus*, *Chaetoceros didymus*, *Chaetoceros danicus*, *Chaetoceros debilis*)는 전반적으로 높게 우점하였다. 이는 우리나라 여름철 남해 외해역 (Park and Lee, 1990)과 하계 남해 동부 연안 (Lim et al., 2007)에서 우점종이 *Chaetoceros*속으로 나타난 결과와 일치하였다. 즉 하계 고수온기에 영양염류가 일정하게 높은 내만에서는 *Chaetoceros*속의 우점할 확률이 높다는 것을 시사 할 수 있다. *Pseudo-nitzschia* spp.와 *Rhizosolenia* spp.는 8월 24일 조사에서 부분적으로 우점하였다. *Skeletonema* spp.는 7월 20일 조사에 두드러졌으며, 특히 4번 정점에서 극히 높은 개체수를 보였다. *Skeletonema* 종은 우리나라 연안에서 흔히 나타나는 종이며, 낙동강하구 (Moon and Choi, 1991), 광양만 (Cho et al., 2007)이나 가막만 (Park et al., 2009) 등의 저염분 수괴에서 우점하는 종으로 알려져 있다. 본 연구에서도 거

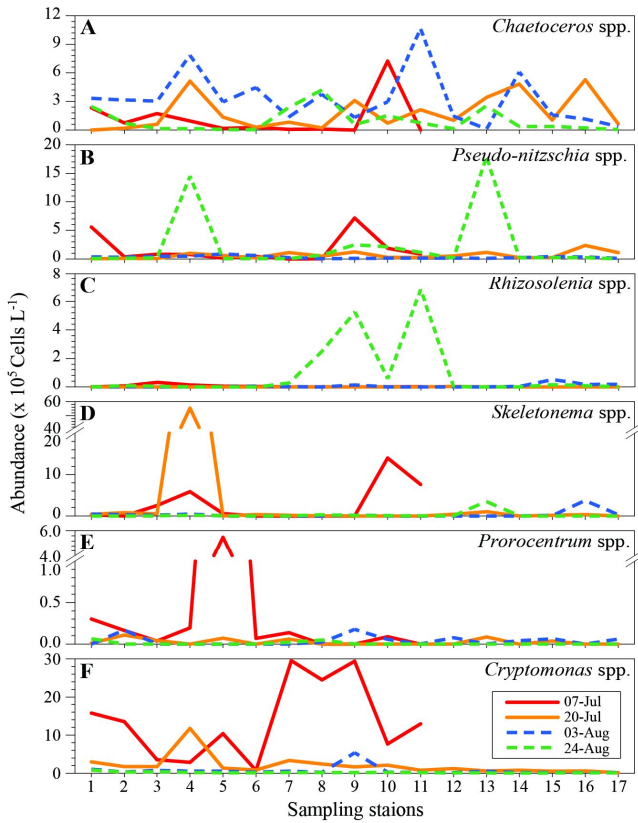


Fig. 8. Dominant species of phytoplankton in each survey.

제 동부 정점들 중에 유일하게 정점 4에서, 낙동강의 영향을 받아 집중강우 후 대발생을 일으켰다. 이는 특히 거제도 연안 해역은 매우 복잡한 해안선을 가지며, 강우시 육지에서 유입되는 비점오염의 영양염류와 함께 낙동강에 의한 영양염류 공급에 의한 이들 중 특이적인 성장으로 기하급수적으로 대발생한 후 생물집적이 중요하게 작용한 것으로 판단된다.

Prorocentrum spp.와 *Cryptomonas* spp.는 7월 6일 조사를 중심으로 우점하였다. 이와 같은 극우점종은 Cluster 분석의 그룹화과정에도 큰 영향을 미쳤다(Fig. 9). 조사 시기 간의 식물플랑크톤의 군집구조의 차이는 명확하지 않았지만, 7월 6일 조사에서는 식물플랑크톤 개체수가 매우 낮았던 거제도 남부에 위치한 정점 6이 별도의 그룹으로 분류되었으며, 거제 남서쪽과 통영의 정점 7, 8, 9가 하나의 그룹으로 묶였다. 이들 정점에서는 *Cryptomonas* spp.의 개체수가 평균 3.03×10^6 cell L⁻¹로 극히 높게 나타난 지역으로, 별도의 그룹화에 중요한 영향을 미친 것으로 확인되었다. 7월 20일 조사에서는 장승포 부근에 위치한 정점 4가 별도의 그룹으로 분류되었으며, 해당 지역에서 *Skeletonema* spp.가 5.51×10^6 cell L⁻¹로 국지적으로 대발생한 것에 의한 것으로 판단된다. 7월 6일 조사에서도 마찬가지로 *Skeletonema* spp.가 정점 4에서 상대적으로 높은 개체수를 보였다. 정점 4를 제외한 거제도 동부 연

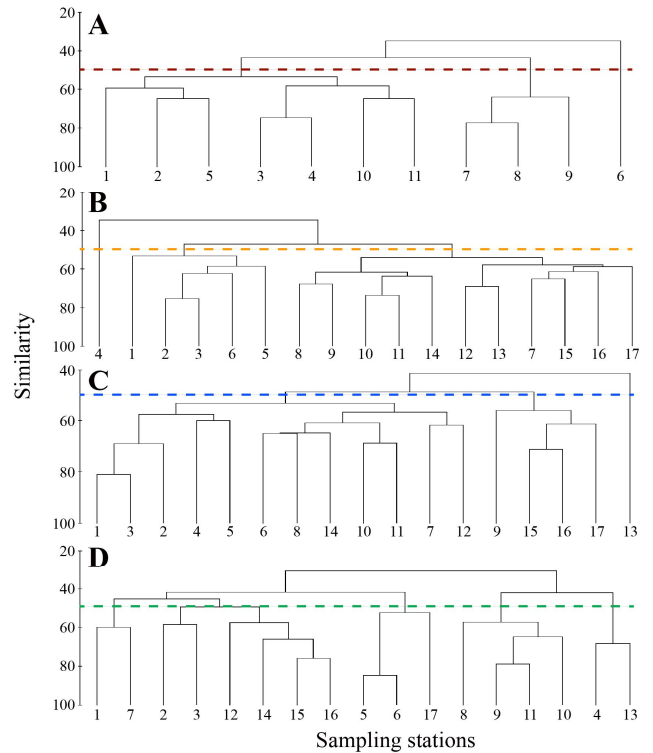


Fig. 9. Cluster analysis for spatial patterns of phytoplankton communities. The dotted lines indicate the 50% similarity (A: July 7; B: July 20; C: August 4; D: August 24).

안 정점(정점 1, 2, 3, 5, 6)이 하나의 그룹으로 분류되었고, 그 외의 정점이 또 다른 그룹으로 구분되었다. 8월 4일 조사에서는 개체수가 극히 낮았던 정점 13에서 단독 그룹으로 구분되었으며, 남해도 남부 정점(정점 15, 16, 17)과 통영 내측 정점(정점9)에서 그룹화 되었고, 그 외 거제 동부를 포함한 모든 정점이 유사한 그룹으로 분류되었다. 8월 24일 조사에서는 비교적 많은 그룹으로 분류되었는데 우선 특이적으로 *Pseudo-nitzschia* spp.가 각각 1.45×10^6 cell L⁻¹과 1.80×10^6 cell L⁻¹로 높은 개체수를 보인 정점 4와 13이 한 그룹으로 구분되어졌으며, 내측 정점인 정점 8~11까지는 상대적으로 높은 *Rhizosolenia* spp.의 영향으로 그룹화 되었다. 그 외에 전반적으로 개체수가 낮았지만 군집조성 특성에 따라 정점 1과 7의 그룹, 정점 2와 3의 그룹, 상대적으로 외양의 영향을 강하게 받는 정점 5, 6, 17의 그룹, 마지막으로 남해도 동부 정점 12, 14, 15, 16이 하나의 그룹으로 구분되었다.

Canonical correspondence analysis(CCA)는 상관 분석(Correspondence analysis)의 한 종류로 생물 군집 구성의 주요 변수와 환경 변수와 관계를 평가하는 분석이다. CCA 분석에서 환경요인과 하계에 우점 출현한 대표종과의 관계를 파악하였다(Fig. 10).

남해동부연안항만에서 하계 단주기 조사에 따른 해양환경 및 식물플랑크톤 군집조성의 변화

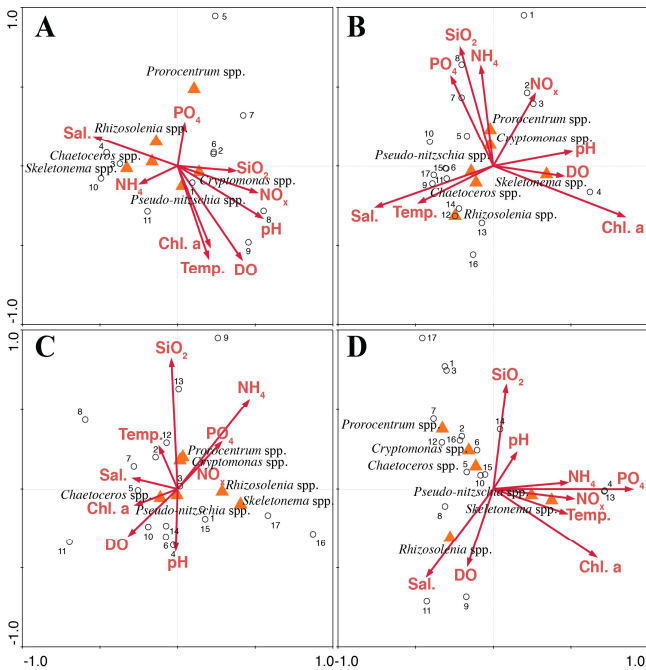


Fig. 10. Canonical Correspondence Analysis (CCA) ordination diagrams of dominant phytoplankton with environmental variables. Environmental variables (Red arrow), Dominant species (Triangle), Sampling station (White circle) (A: July 7; B: July 20; C: August 4; D: August 24).

7월 6일 조사에서 pH, 규산염과 아질산염이 같은 방향으로 향하여 양(+)의 상관성을 확인하였고, 이와 더불어 수온, DO, Chl. a도 일정한 양의 상관성을 보였다. 이와 같은 상관성이 높은 곳에서 은편모그룹이 상대적으로 높게 구성되었다. 반면, 염분은 *Skeletonema* spp.와 *Chaetoceros* spp.와 일정하게 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 7월 20일 조사에서는 정점 4에서 Chl. a 농도가 높게 나타났고, 이는 *Skeletonema* spp.의 대발생이 Chl. a 농도에 기여하여 양의 상관성이 확인되었다. 아울러, 염분과 수온이 일정한 양의 상관관계가 성립되었고, 이곳에 *Chaetoceros* spp.와 *Rhizosolenia* spp.가 높게 출현한 정점과 일치하였다. 특히, 영양염류 규산염, 암모니아, 인산염이 같은 방향으로 향하고 있어, 정점 6과 7에서 영양염 공급원이 유사하다는 것을 시사하고 있다. 8월 4일 조사에서는 환경인자간의 뚜렷한 차이를 구분할 수 없었고, Chl. a와 *Chaetoceros* spp.는 일정한 연관성이 있는 것으로 파악되었다. 8월 24일 조사에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 Chl. a와 일정한 관계가 있는 것으로 파악되었고, 이는 수온, 질산염, 암모니아와 일정한 양의 상관성을 확인할 수 있었다. 본 연구조사 정점의 내만 및 항구에서는 적조생물 *C. polykrikoides*의 출현은 관찰되지 않았고, 이는 수심이 낮은 내만과 항만에서 *C.*

*polykrikoides*의 휴면포자가 발아하여 유영세포로 기여할 수 있는 확률이 극히 낮을 것으로 생각된다. 특히, 2016년도 8월 중순 전남 고흥 부근에서 *C. polykrikoides*의 적조가 국부적으로 관찰(국립수산과학원 적조속보)되었으나, 대규모 증식 및 확산은 이루어지지 않았다. 이는 앞서 언급한 양쯔강기원의 저염분과 고수온에 의하여, 평년보다 1개월 늦게 적조가 발생하였고, 아울러 동시기에 일본 규슈북동쪽으로 지나간 태풍의 영향으로 수계의 교란 및 수층혼합이 강하게 형성되어 적조생물의 개체수가 모두 소멸된 것으로 추정된다(미공개 자료). 추후 적조생물 *C. polykrikoides*의 저염분 및 고수온의 적응 및 성장에 관한 구체적인 실험과 병행하여, 태풍으로 인한 강한 수층혼합에 의한 *C. polykrikoides*의 세포파괴에 관한 연구가 필요할 것이다. 또한, 남해 및 남동해역의 내만 및 연안해역의 퇴적물 내 휴면포자의 분포양상도 정밀하게 조사할 필요성이 대두되었다.

4. 결론

2016년 하계는 폭염과 양쯔강 희석수의 영향으로 남해 전 해역에서 고수온 저염분수가 관측되었다. 식물플랑크톤 군집조성은 7월 6일 조사시 *Cryptomonas* spp.가 우점종이었으며, 특히적으로 정점 5에서 와편모조류(*Prorocentrum* spp.)가 극히 높은 비율을 차지했다. 7월 20일 조사에서는 규조류(*Chaetoceros* spp.) 점유율이 가장 높았으며, 정점 4에서는 *Skeletonema* sp.의 비율이 매우 높았다. 8월 4일 조사, 8월 24일 조사에서는 유사하게 매우 낮은 개체수를 보였으며, 규조류가 가장 높은 점유율을 보였다. 그 중에서도 8월 4일 조사에서는 *Chaetoceros* spp.가 우점종이었으며, 8월 24일 조사에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 정점 4와 13에서 우점하였고, 정점 9와 11에서는 *Rhizosolenia* spp.가 우점하였다. 본 연구의 각 정점은 지리적으로 가까운 해역에 위치함에도 불구하고, 내만 특유의 반 폐쇄적인 효과에 의하여 영양염류와 같은 해양환경특성이 명확하게 차이를 보였다. 이와 같은 환경요인의 차이는 식물플랑크톤의 우점종 뿐 만 아니라 군집조성에도 중요하게 작용하여, 각 정점별, 시기별 식물플랑크톤의 출현양상이 현저하게 다르게 나타나는 것을 파악하였다.

사 사

본 연구사업은 미래창조과학부 해양극저기초원천기술개발사업[NRF-2016M1A5A1027456]과 KIOST주요사업의 재원 지원을 받아 수행되었다(PE99432).

References

- [1] Cho, E. S., S. Y. Lee, S. S. Kim and Y. S. Choi(2007), Marine environments and ecological characteristics of phytoplankton in Southern coastal waters during June to October in 2004-2006, *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 16(8), pp. 941-957.
- [2] Choi, Y. H., K. T. Seong, H. G. Choi, M. J. Lee and K. H. Ju(2016), Characteristics of marine environment in the western part of South Sea in the summer of 2016, *Proceedings of the Korea Environmental Sciences Society Conference*, Vol. 25(1), pp. 103-103.
- [3] Guinder, V. A., C. A. Popovich, J. C. Molinero and J. Marcovecchio(2013), Phytoplankton summer bloom dynamics in the Bahía Blanca Estuary in relation to changing environmental conditions, *Continental Shelf Research*, Vol. 52, pp. 150-158.
- [4] Hallegraeff, G. M., D. M. Anderson, A. D. Cembella and H. O. Enevoldsen(2003), *Manual on harmful marine microalgae*, Unesco.
- [5] Jang, P., W. J. Lee, M. Jang, J. D. Lee, W. J. Lee, M. Chang, K. Hwang and K. Shin(2005), Spatial and temporal distribution of inorganic nutrients and factors controlling their distributions in Gwangyang Bay, *Ocean and polar research*, Vol. 27(4), pp. 359-379.
- [6] Kang, C. K., P. J. Kim, W. C. Lee and P. Y. Lee(1999), Nutrients and phytoplankton blooms in the southern coastal waters of Korea: I. The elemental composition of C, N and P in particulate matter in the coastal bay system, *Journal of the oceanological Society of Korea*, Vol. 34, pp. 86-94.
- [7] Kattner, G.(1999), Storage of dissolved inorganic nutrients in seawater: poisoning with mercuric chloride, *Marine Chemistry*, Vol. 67(1-2), pp. 61-66.
- [8] KNN News(2016), <http://www.knn.co.kr/103376>.
- [9] Kwon, K. Y., C. H. Moon and H. S. Yang(2001), Behavior of nutrients along the salinity gradients in the Seomjin River estuary, *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, Vol. 34, pp. 199-206.
- [10] Lee, J. W., K. C. Kim, S. Y. Kang and D. H. Doh(1997), Development of simulation model for diffusion of oil spill in the ocean - Three dimensional characteristics of the circulation if the nearly closed bay, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 11(2), pp. 241-255.
- [11] Lee, P. Y., C. K. Kang, J. S. Park and J. S. Park(1994), Annual change and C:N:P ratio in particulate organic matter in Chinhae Bay, *Journal of the oceanological Society of Korea*, Vol. 29, pp. 107-118.
- [12] Moon, C. H. and H. Choi(1991), Studied on the environmental characteristics and phytoplankton community in the Nakdong River estuary, *Journal of the oceanological Society of Korea*, Vol. 24(2), pp. 144-154.
- [13] Park, C. K.(1978), Chemical oceanographic aspect of the cold water mass in offshore of the east coast of Korea, *The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science*, Vol. 11(2), pp. 49-54.
- [14] Park, J. S. and S. G. Lee(1990), Distribution and Species Composition of Phytoplankton in the Southern Waters of Korea and their Relation to the Character of Water Masses, *The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science*, Vol. 23(3), pp. 208-214.
- [15] Park, J. S., Y. H. Yoon and S. J. Oh(2009), Variation characteristics of phytoplankton community in the mouth parts of Gamak Bay, Southern Korea, *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 27(2), pp. 205-215.
- [16] Park, T., C. J. Jang, J. H. Jungclaus, H. Haak, W. Park and I. S. Oh(2011), Effects of the Changjiang river discharge on sea surface warming in the Yellow and East China Seas in summer. *Continental Shelf Research*, 31(1), 15-22.
- [17] Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli(1984), *A manual of biological and chemical methods for seawater analysis*, Publ. Pergamon Press, Oxford, pp. 184.
- [18] Thompson, P. A., P. I. Bonham and K. M. Swadling(2008), Phytoplankton blooms in the Huon Estuary, Tasmania: top-down or bottom-up control?, *Journal of Plankton Research*, Vol. 30(7), pp. 735-753.
- [18] Yoo, J. T., Y. H. Kim and S. H. Lee(2017), Distribution of Egg and Larval of Anchovy and Catches Fluctuation in the Southern Coast of Korea in the Summer, 2016, *KOFFST International Conference*, pp. 302-302.

Received : 2017. 07. 13.

Revised : 2017. 09. 05. (1st)

: 2017. 09. 27. (2nd)

Accepted : 2017. 10. 28.