

## 독도 인근해역 동물플랑크톤 장기간 특성

강정훈<sup>1\*</sup>, 김웅서<sup>2</sup>, 권오윤<sup>1</sup>, 조규희<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 남해특성연구센터, <sup>2</sup>한국해양과학기술원 심해저광물자원연구센터,  
<sup>3</sup>(주)엔비엔트

## Long-term variation of zooplankton around Dokdo in the East Sea

Jung-Hoon Kang<sup>1\*</sup>, Woong-Seo Kim<sup>2</sup>, Oh Youn Kwon<sup>1</sup>, Kyuhee Cho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>South Sea Environment Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

<sup>2</sup>Deep-Sea and Seabed Mineral Resources Research Center, Korea Institute of Ocean  
Science & Technology

<sup>3</sup>Envient incorporation

**요약** 2006년부터 2015년까지 동해 독도 인근해역에서 동물플랑크톤 군집의 변동특성을 조사하였다. 동물플랑크톤 시료는 고정정점의 수온약층 상부수층에서 표준네트로 수직예인하여 획득하였다. 평균수온과 염분은 장기적으로 뚜렷한 변화는 없었으나, 2013년과 2015년 여름철에 상대적으로 낮은 염분이 관측되었다. 동물플랑크톤 평균 개체수는 여름철 기준으로 317 inds./m<sup>3</sup>(2008년)부터 10,242 inds./m<sup>3</sup>(2015년)까지 증가추세를 나타냈고, 동물플랑크톤 장기간 증가는 먹이생물인 엽록소-a 농도 증가와 잠재적 포식자인 주요 어류(멸치, 꽁치, 오징어, 청어, 전갱이)의 어획생산량 감소와 같이 나타났다. 증가를 주도한 우점종은 점진적으로 증가하는 유형류(*Oikopleura* spp.), 여름철에 주로 출현하며 2012년 이후 급속히 증가한 야광충(*Noctiluca scintillans*)과 지각류(*Penilia avirostris*), 그리고 2010년 여름철에 출현하기 시작하여 빠른 속도로 증가한 요각류(*Paracalanus parvus* s.l.)로 구분되었다. 본 연구결과는 독도주변해역에서 장기간 증가한 동물플랑크톤 개체수가 먹이농도의 증가와 상위포식자의 포식압 감소와 관련있음을 시사하였다.

**Abstract** We investigated the abundance and composition of the zooplankton community around Dokdo in the East Sea from 2006 to 2015. Zooplankton samples were collected in the surface mixed layer by vertical hauls using a standard type net at the monitoring stations. There were no clear long-term trends in the average temperature and salinity, but relatively low salinity was recorded in the summer of 2013 and 2015. The average abundances of zooplankton in the summer increased by two orders of magnitude from 317 inds./m<sup>3</sup> in 2008 to 10,242 inds./m<sup>3</sup> in 2015. This long-term increase was accompanied by a slight increase in the chlorophyll-a concentration and a decrease in the catch of potential crucial predators (anchovy, mackerel pike, squid, herring and horse mackerel) in the study area. The dominant zooplankton, accounting for most of the long-term increase, consisted of appendicularian (*Oikopleura* spp.), which showed a steady increase since 2012, summer species such as *Noctiluca scintillans* and the cladoceran *Penilia avirostris*, which showed an abrupt increase, and the copepod *Paracalanus parvus* s.l., which showed a rapid increase after its first occurrence in summer 2010. These results suggest that the long-term increase of zooplankton could be related to the increase in the concentration of prey and the decrease in the predation pressure of potential predators around Dokdo in the study area.

**Keywords** : Dokdo, East Sea, Long-term variation, predation pressure, Zooplankton

본 논문은 과제 [독도의 지속가능한 이용연구 (PG49260)]의 지원으로 작성되었음.

\*Corresponding Author : Jung-Hoon Kang(Korea Institute of Ocean Science & Technology)

Tel: +82-55-639-8517 email: jhkang@kiost.ac.kr

Received August 3, 2016

Revised (1st September 7, 2016, 2nd September 8, 2016)

Accepted September 9, 2016

Published September 30, 2016

## 1. 서론

동해에 위치한 독도를 중심으로 사방으로 트여있는 주변해역은 울릉도와 함께 어울려 매우 다양한 형상의 물리, 화학적 요인들이 서로 역동적으로 나타나는 곳으로서, 동물플랑크톤의 출현양상을 연구하는데 있어 계절적 관점보다 중규모의 해양특성을 고려한 연구가 더욱 요구되는 곳이다[1-7]. 독도 주변해역에서 수행된 기존 동물플랑크톤 연구들은 접근 가능한 제한된 시기의 동물플랑크톤 일부 분류군과 군집의 계절적 특성(개체수 및 종조성)보고가 주를 이루었다[5, 6, 8-10]. 동물플랑크톤의 종조성과 개체수는 물리적 강제력(physical forcings), 해류의 특성, 먹이 이용도(resource availability), 포식자의 영향(predation pressure) 그리고 기후변동에 의한 생태계 체제변화(regime shift)에 의해 끊임없이 변화한다. 동해환경을 지배하는 중규모 환경특성중 하나인 난수성 소용돌이 구조, 한류와 난류가 교차하여 만나는 전선역, 심층해류의 상승과 담수 배출에 의한 독도 섬 자체의 섬 효과가 동물플랑크톤의 분포 및 변동특성에 영향을 끼치는 대표적인 물리적 영향요인으로 알려져 있다[7, 9, 11].

따라서 독도 인근해역의 소규모 조사를 통해 독도환경과 동물플랑크톤 분포의 상호작용을 규명하는 것은 쉽지 않은 일이다. 독도 및 주변해역 생태계의 현 상태를 파악하여 독도의 지속가능한 이용에 필요한 정보를 동물플랑크톤을 통해 도출하기 위해, 상향조절 및 하향조절 관점에서 동물플랑크톤의 역할과 물리, 화학적 환경과의 상호작용을 파악할 필요가 있다. 이를 위해 적합한 조사 형태는 중규모 이상의 공간분포 조사와 장기간 모니터링이며, 결과적으로 기후변동과 같은 거시적 환경변화와 동물플랑크톤의 먹이망 내 역할 및 반응을 규명할 수 있다. 동물플랑크톤은 부유생태계에서 일차생산자와 포식자 사이에서 에너지를 직접적으로 전달하는 매개체이며, 배설물이나 사체가 바닥으로 침강하여 저서생태계를 부양하는 역할을 한다. 본 연구는 독도 주변에서 나타나는 동물플랑크톤을 2006년부터 2015년까지 조사하여, 독도 주변해역에서 나타나는 동물플랑크톤 종조성과 개체수의 변화추세와 그 의미를 기술하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 동물플랑크톤 채집

독도주변 동물플랑크톤 장기관 조사는 2006년 12월부터 2015년 9월까지 ‘독도의 지속가능한 이용연구’ 과제에서 다양한 환경분야의 장기간 모니터링 연구를 위해 선정된, 울릉도에서 독도를 가로지르는 고정정점 6곳(16, 20, 30, 47, 45, 50)에서 진행되었다. 본 정점 6곳은 동해안을 따라 흐르는 동한난류가 떨어져 나와 지나가는 길목에 있고, 난수성 소용돌이 구조와 극전선(subpolar front)이 나타나는 위치이며, 섬의 특성과 영향이 잘 나타나는 곳으로서 장기간 누적결과를 통해 해양학적 특성을 확인할 수 있는 곳으로 선정되었다. 기존에는 동계 기상조건 때문에 동계자료가 없는 점을 고려하여, 겨울을 대표하는 시기인 2006년 12월부터 2007년 3월과 12월에 조사하였다. 장기간 고정 정점 6개를 기준으로, 2006년 12월, 2007년 3월 및 12월 자료는 채집 정점 수 (2 - 3개 정점)가 적었으나, 본 자료 정리 및 분석에 포함하였다. 그리고 2008년 8월부터 2015년 8월까지 독도 주변해역의 동물플랑크톤 종조성과 개체수 조사를 6개 정점에서 매년 두 차례 방문하여 수행하였다[Fig. 1]. 한국해양과학기술원 해양조사선 ‘이어도 호’를 이용하여 매 정점에서 채집에 앞서 CTD (SBE 911 plus)를 내려 수온과 염분의 수직분포를 확인한 후, 급격한 수온변화가 나타나는 수온약층 (Thermocline depth) 상부를 대상으로 채집하였다. 동물플랑크톤 채집은 망구직경 60 cm, 망목크기 300  $\mu\text{m}$ 의 표준네트(2006-2008년)와 200  $\mu\text{m}$ 의 폐쇄네트(Opening-Closing net)(G.O.)를 사용하였다.

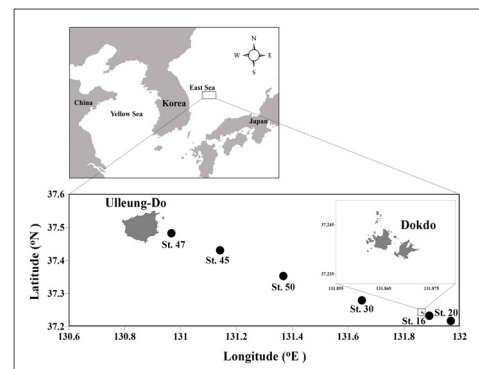


Fig. 1. Map showing stations for the long-term monitoring of zooplankton around Dokdo from 2006 to 2015.

채집은 정선 상태에서 목표 수심까지 네트를 내려 30 ~ 50 m/min의 속도로 수직으로 표층까지 예인하였다.

네트에 여과된 해수량을 계산하기 위해 네트 입구에 유량계(Hydro-Bios Kiel 438110: back-run stop)를 부착하여 이용하였다. 코드엔드 버킷에 모여진 시료를 1리터 폴리에틸렌 시료병에 옮겨 담은 후 중성포르말린으로 최종 농도가 약 5%가 되도록 고정시켜 실험실로 옮겨 보관하였다. 실험실에서 시료병 속의 동물플랑크톤 시료를 잘 섞은 후 파이펫(10 mL)으로 부표품 (subsample) 4 - 8 mL을 채취하여, 계수판(Bogorov counting tray)에서 계수하였다. 요각류는 중 수준까지, 그 외 동물플랑크톤은 속 수준 혹은 분류군별로 현미경(Zeiss Model Discovery SteREO V8, Germany) 하에서 동정하였다. 계수된 동물플랑크톤 시료는 최종적으로 inds./m<sup>3</sup>으로 환산하였다. 동물플랑크톤 평균 개체수와 총 엽록소-a 평균 농도의 장기간 변화추세 파악을 위해 통계프로그램 (SPSS 12.0, USA)을 사용하여 선형 회귀분석을 하였다.

## 2.2 장기간 자료분석

장기간 분석자료는 시, 공간적 변이비교를 위해 상호 비교 가능한 형태로 정리되어야 할 필요가 있다. 2006년부터 2008년 8월까지 수집된 자료의 채집시기는 12월, 3월 그리고 8월이고, 2009년부터 2011년까지는 8월, 10월, 7월, 2월이 혼재해 있으며, 2012년부터 2015년까지는 4월, 5월, 8월, 9월이 혼재해 있으나 봄과 여름철을 대표하는 시기였다. 전체적으로 여름철인 8월 채집자료가 상당수 차지하였으나, 장기간 특성을 확인하기 위해 일차적으로 모든 자료들을 배열하여 그 변이를 확인하였다. 그 후 여름철과 봄철을 구분하여 그 특성을 재확인하였다. 사용된 채집네트는 2006년부터 2008년 8월까지 망구직경 60 cm, 망목크기 300  $\mu$ m였으며, 2009년 8월부터 2015년 8월까지 망구직경 60 cm, 망목크기 200  $\mu$ m이었다. 서로 다른 망목크기의 네트채집에 영향을 가장 많이 받는 모든 종류의 미생속체를 장기간 자료에서 제거하였다. 또한 동물플랑크톤의 고유행동인 주야수직이동(diel vertical migration)으로 인해 낮과 밤의 출현 개체수가 다르게 나타난다. 독도생태계 종합조사 특성 상 대형연구조사선으로 다양한 분야의 연구자가 탑승하여 조사하므로, 고정된 시간대에 조사하는 것은 사실상 불가능하다. 결과적으로 채집시간은 주간, 야간, 해뜰녘, 해질녘으로 혼재되어 있다. 이에 수온약층 상부(대부분 수심 100-150 m에서 표층에서 주, 야간의 출현개체수 차이가 있을 수 있는 플랑크톤을 장기간 분석자료에서

제외하였다. 제외된 동물플랑크톤은 요각류 *Calanus sinicus*, *Metridia pacifica*, 그리고 *Scolecithricella minor*였다[11, 12].

## 3. 결 과

### 3.1 장기간 수온 및 염분

연구기간 중 모든 정점의 평균수온(수온약층 상부)은 7.5℃를 나타낸 2007년 12월에 가장 낮았고, 2010년 10월에 가장 높았다(17.9℃). 이 차이는 장기간 변동이라는 측면보다 채집시기에 따른 계절적 특성에 기인하였다. 특히 2012년부터는 봄철과 여름철의 계절적 특성을 반영한 수온변이를 뚜렷이 나타냈다[Fig. 2]. 공간적으로는 울릉도 인근 정점인 47, 45, 30에서의 수온(13.6-14.5℃)이 독도 인근해역인 정점 16과 20 그리고 중간 지점인 정점 30(9.9-12.6℃)에 비해 높은 경향을 나타냈다. 채집 횟수가 가장 많았던 여름철인 8, 9월을 기준으로 나타난 장기간 수온변동은 뚜렷하지 않았다.

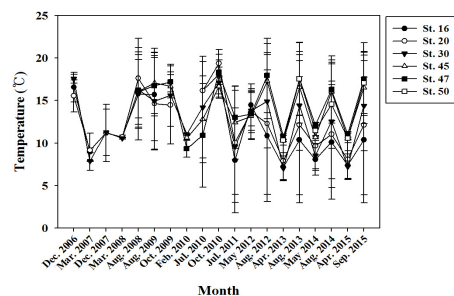


Fig. 2. Temporal variation of average temperature at the monitoring stations around Dokdo from 2006 to 2015.

연구기간 중 평균염분(수온약층 상부)은 2012년 5월에 가장 높았고(34.42), 2013년 8월에 가장 낮았으며, 2015년 9월의 염분도 다른 시기에 비해 낮았다(33.33). 강수량은 2015년 9월에 비해 2013년 8월이 높지 않았으나, 염분이 상대적으로 낮았던 것은 특징적이었다. 또한 2013년 여름철에서 2015년 여름철로 가면서 강수량이 42.5-176.6 mm의 범위에서 점차 증가하였고, 모든 조사 시기의 평균강수량보다 높았다[www.kma.go.kr]. 조사 지역의 강수량은 조사 10일전부터 조사 시기까지의 누적값을 선택했다. 정점 별 평균염분은 정점 50에서만만

33.6을 나타냈고, 다른 정점들은 모두 33.9를 나타내 연 구기간 중 정점별 차이가 거의 없었다[Fig. 3].

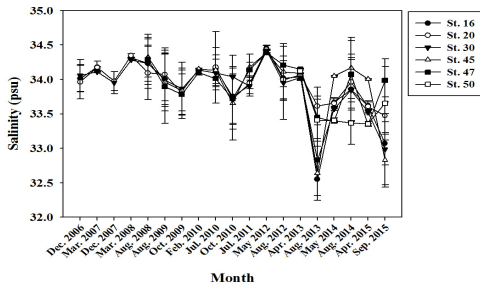


Fig. 3. Temporal variation of average salinity at the monitoring stations around Dokdo from 2006 to 2015.

### 3.2 동물플랑크톤 개체수 및 군집구조

동물플랑크톤의 평균 개체수는 197(2007년 12월)-17,749(2014년 5월) inds./m<sup>3</sup>의 범위에서 계절적 특성의 변이를 나타내며 점진적으로 증가하였다[Fig. 4].

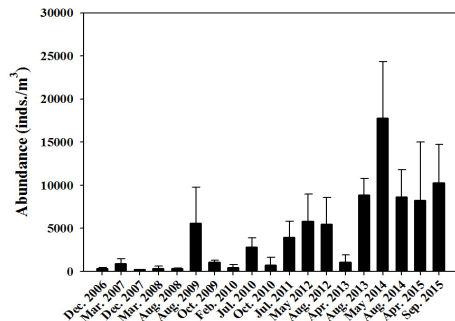


Fig. 4. Temporal variation in the average abundances of zooplankton at the monitoring stations around Dokdo from 2006 to 2015.

겨울철(12월, 2월)과 초봄(3월, 4월)의 개체수가 상대적으로 낮고, 늦봄(5월)의 개체수가 상대적으로 높았다. 2010년을 기준으로 이전(2006-2009년)까지의 평균 개체수는 1,253 inds./m<sup>3</sup>였고, 이후(2010-2015년)의 개체수는 6,166 inds./m<sup>3</sup>를 나타내 그 차이가 뚜렷하였다. 증가 유무를 명확히 구분하기 위하여 계절을 기준으로 연간변이를 확인하였다. 그 일환으로, 채집시료 횟수가 가장 많은 여름철(8회, 317-10,242 inds./m<sup>3</sup>)과 봄철(6회, 357-17,749 inds./m<sup>3</sup>)의 동물플랑크톤 개체수를 구분하여 분석한 결과 모두 증가추세를 나타냈으며, 여름철에

특히 뚜렷하였다[Fig. 5].

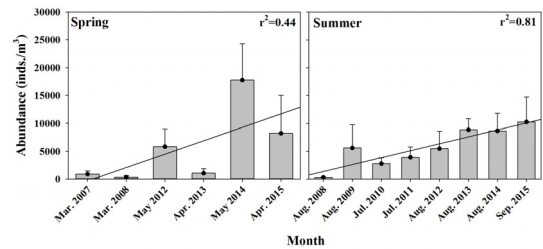


Fig. 5. Temporal variation in the average abundances of zooplankton at the monitoring stations around Dokdo in spring and summer from 2006 to 2015.

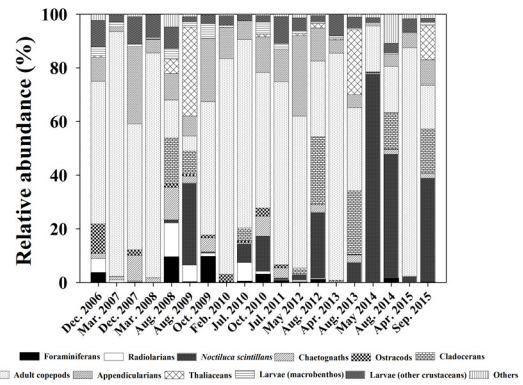


Fig. 6. Temporal variation in community structure of zooplankton at the monitoring stations around Dokdo from 2006 to 2015.

연구기간 중 출현한 종 및 분류군은 유공충류(foraminiferans), 방산충류(radiolarians), 모악류(chaetognaths), 패충류(ostracods), 지각류(cladocerans), 요각류(copepods), 유형류(appendicularians), 탈리아류(thaliaceans), 유생류, 야광충(*Noctiluca scintillans*) 그리고 기타 희귀종(rare species)이었다[Fig. 6]. 겨울철과 봄철에는 요각류와 유형류가 상대적으로 우점한 반면, 여름철에는 탈리아류, 지각류와 야광충이 상대적으로 우점하였다. 예외적으로 2010년 7월, 10월, 2011년 7월의 경우 여름철이지만 요각류의 점유율이 높았고, 이를 주도한 우점종은 *Paracalanus parvus* s.l., *Oncaea* spp., *Clausocalanus* spp.이었다. 2012년을 포함한 이후 여름철에 지각류인 *Penilia avirostris*의 점유율이 눈에 띄게 높았다. 2010년 이전 여름철에 한해 1.16-30.64%의 출현점유율 범위에서 높은 변동을 나타내던 야광충이 점차

증가하여, 계절에 상관없이 높은 출현점유율을 나타냈다 (2014년 5월: 77.9%, 8월: 46.2%, 2015년 9월: 38.7%).

### 3.3 우점 분류군의 구성과 개체수

연구기간 출현한 동물플랑크톤의 총 누적 개체수의 3%이상을 차지한 분류군과 종은 6종과 2분류군이었다 [Fig. 7]. 최우점종은 야광충 (32.9%)이었고, 뒤를 이어 요각류인 *P. parvus* s.l. (14.2%), 유형류인 *Oikopleura* spp. (7.4%), 탈리아류(6.6%), 지각류인 *P. avirostris* (5.4%), 요각류인 *Pseudocalanus minutus* (3.9%), *Clausocalanus* spp. (3.0%)이었다[Fig. 7]. 출현점유율이 3% 미만인 146종과 분류군은 모두 합쳐 26.5%를 나타내 독도 인근해역의 출현 종 다양성이 매우 높음을 시사하였다[Fig. 7]. 최우점종인 야광충은 2011년까지는 주로 여름철에 출현하였으나, 2012년부터는 봄철에도 관찰되었다. 여름철에 가장 높은 개체수는 3,990 inds./m<sup>3</sup>(2014년 8월)이었던 반면, 봄철에는 13,818 inds./m<sup>3</sup>이었다 (2014년 5월)[Fig. 8]. 야광충은 여름철에 지속적 출현과 증가추세를 나타냈으나, 봄철에는 2014년에 한정되어 현재까지 가장 높은 개체수를 나타냈다[Fig.8]. *P. parvus* s.l.는 봄철과 여름철에 모두 지속적으로 출현하여 증가추세를 나타냈으며, 특히 봄철의 증가양상이 뚜렷하였다[Fig. 8]. 유형류인 *Oikopleura* spp.는 봄과 여름철 모든 시기에 출현했고, 특히 여름철에 상대적으로 높은 개체수범위에서 뚜렷한 증가추세를 나타냈다. 예외적으로 2012년 5월에 가장 높은 개체수가 관측되었다(1,752 inds./m<sup>3</sup>)[Fig. 8]. 지각류인 *P. avirostris*는 하계에만 나타났고, 2012년 여름철 이후에 약 10배 이상 증가하였고, 특히 2013년, 2014년 그리고 2015년 여름에 관측된 상대적으로 낮은 염분과 일치하였다[Fig. 8].

주로 여름철에 높은 개체수를 나타낸 탈리아류는 겨울철을 제외한 모든 시기에 지속적으로 출현하였다. 특히 2009년 8월(1,860 inds./m<sup>3</sup>), 2013년 8월(2,133 inds./m<sup>3</sup>), 그리고 2015년 9월(1,302 inds./m<sup>3</sup>)에 최고치를 나타냈다. 이와같은 간헐적 출현으로 증가를 언급하기가 매우 어렵다. *P. minutus*는 주로 겨울철과 봄철에 출현하였고, *Clausocalanus* spp.는 주로 봄철과 여름철에 출현하였으며, 봄철 개체수가 상대적으로 높았다. 이 두 종 또한 간헐적 출현으로 증가추세가 뚜렷하게 나타나지 않았다[Fig. 8].

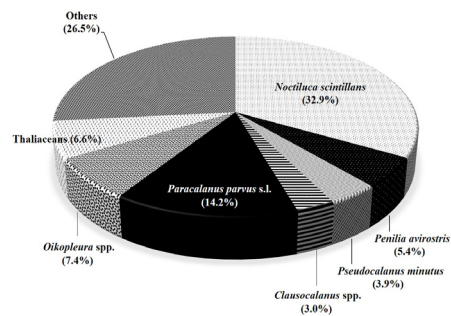


Fig. 7. Dominant zooplankton over 3% occupation to accumulative total abundances at the monitoring stations around Dokdo from 2006 to 2015. others: sum of species and taxon below 3% to total abundance.

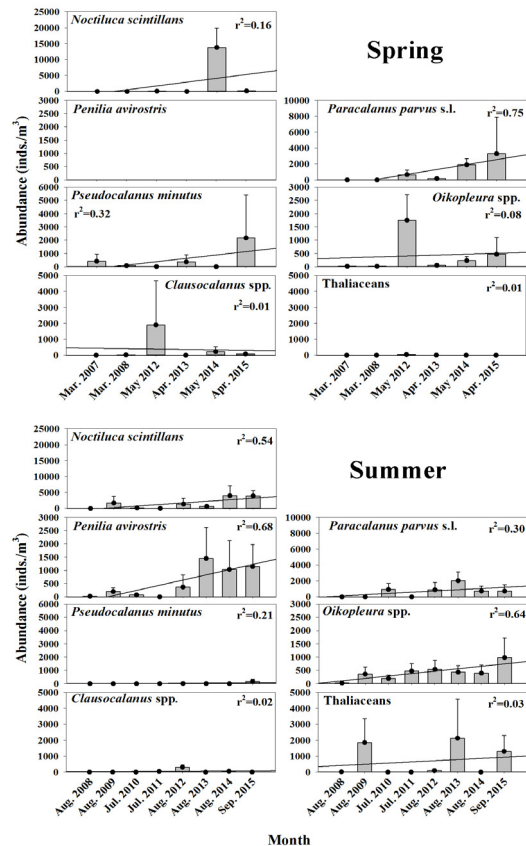


Fig. 8. Temporal variation in the averaged abundance of dominant zooplankton at the monitoring stations around Dokdo in spring and summer from 2006 to 2015.



#### 4. 고 찰

울릉도-독도 주변해역의 중형동물플랑크톤의 평균 개체수는 2006년 이후 2015년까지 꾸준히 증가경향을 나타냈다. 이 증가양상은 채집횟수가 가장 많았던 여름철과 봄철에 출현한 개체수의 증가추세가 이끌었다. 지속적으로 출현하여 점진적인 증가를 나타낸 유형류(*Oikopleura* spp.)와 여름철에 주로 출현하며 2012년 이후 급진적으로 증가한 야광충과 지각류(*Penilia avirostris*), 그리고 2010년 여름철에 출현하기 시작하여 빠른 속도로 증가한 요각류(*P. parvus* s.l.)가 장기간 증가를 이끌었다. 이 종들의 공통점은 초기에 매우 적은 수의 출현 혹은 미 출현 상태에서 2010년 이후에 계절적 특성을 갖고 빠른 속도로 증가했다는 점이다. 또한 여름철에 출현하여 전체개체수의 증가를 이끈 우점종이기도 하다[Fig. 8]. 이는 2010년을 기점으로 울릉도와 독도 주변해역의 동물플랑크톤을 둘러싼 환경이 바뀌고 있음을 시사한다.

기존에 보고된 동물플랑크톤의 장기간 변동은 대부분 생물량의 감소였으며, 그 원인들은 기후변동에 의한 수문화학적 환경변화(상향조절)와 포식자의 포식압력(하향조절) 변화였다[13-17]. 미국 캘리포니아 연안해역에서 동물플랑크톤 생물량이 1951년 이후 43년간 초기 생물량의 80% 수준으로 감소한 이유는 온난화 현상에 의한 표층수와 구조특성 변화 때문이었다[13]. 대표적인 상향조절(bottom-up regulation)의 경우로, 온난화에 의해 증가한 표층수온이 강한 성층구조를 만들어 용승(upwelling)에 의한 식물플랑크톤의 신생산(new production)이 감소하여, 작은 크기의 동물플랑크톤만이 존재하여 전체적인 생물량이 감소한 예가 있다. 이와 유사한 상향조절 기작으로서 북해(North Sea)에서 기후변동으로 인한 수온과 염분의 변화에 반응을 나타낸 요각류(*Pseudocalanus elongatus*, *Temora longicornis*, *Acartia* spp., *Centropages hamatus*)와 지각류의 생물량 감소와 포식자인 발틱청어류(*Clupea harengus*)의 성장을 감소를 보고한 바 있다[15, 16]. 1982년 이후 20여 년간 중국 보해만(Bohai Sea)에서의 기온, 표층수온 및 표층염분의 증가가 식물플랑크톤, 동물플랑크톤과 저서생물의 생물량의 감소와 상관성이 유의함이 보고되었다[18]. 반면 동물플랑크톤의 증가가 보고된 사례 중 상향조절과 하향조절의 복합적인 영향의 사례로서, 1951년

이후 45년간 남아프리카의 Benguela Current에서 동물플랑크톤 섭식어류인 멸치류(anchovy)와 정어리류(sardine)의 어획량이 감소한 결과 낮아진 포식압(predation pressure)과 용승작용(upwelling)강화에 의한 일차생산력 증가로 인해 동물플랑크톤 개체수가 100배 증가한 사례가 있다[14]. 이 뿐만 아니라 황해에서 1990년대에 출현한 요각류 *Calanus sinicus*의 평균개체수가 1980년대에 비해 증가한 이유가 일정한 식물플랑크톤 생물량 조건에서 포식자인 멸치류의 어획량 감소와 수온의 증가였음이 보고되었다[19]. 한편 북해 중서부해역에서 어류가 아닌 다른 요각류 포식자인 모악류(*Sagitta elegans*)가 봄철 요각류 성장률에 영향을 미쳤음이 보고된 바 있다[17].

본 연구해역에서 수온과 염분은 2006년 이후 2015년까지 뚜렷한 증감이 없었고, 다만 2013년과 2015년의 여름철에 상대적으로 낮은 염분이 나타났다[Figs. 2, 3]. 한국해양과학기술원 독도종합정보시스템의 해양과학자료에 따르면, 동일기간동안 동물플랑크톤의 먹이인 식물플랑크톤을 나타내는 엽록소-*a* 농도는 평균 0.40-1.44  $\mu\text{g/L}$ 의 범위에서 점진적인 증가경향을 나타냈다[www.dokdo.re.kr]. 또한 이 증가경향은 봄철(0.40-1.44  $\mu\text{g/L}$ )과 여름철(0.32-0.56  $\mu\text{g/L}$ )의 엽록소-*a* 농도 증가에 의해 주도되었다[www.dokdo.re.kr]. 이는 먹이농도가 장기적으로 증가하여 동물플랑크톤이 섭식하고 번식하는데 제한적 조건이 아님을 의미한다. 연구해역에서 동물플랑크톤의 잠재적 포식자인 멸치류, 꽂치류, 오징어류, 청어류 그리고 전갱이류의 어획량에 따르면, 2012년 이후에 서로 다른 어획량 범위 내에서 점차적인 감소를 기록하였다[www.fips.go.kr]. 상기 동물플랑크톤의 먹이농도와 포식자 어획량자료는 본 연구에서 관찰된 동물플랑크톤 평균개체수의 증가가 잠재적 포식자의 감소(하향조절)와 먹이농도의 점진적 증가(상향조절)에 기인한 것임을 지지하였다.

동물플랑크톤 장기간 변동의 선행사례와 달리, 본 연구에서의 동물플랑크톤 장기간 증가경향은 네 가지 다른 우점 분류군에 의해 주도되었다. 본 연구결과에서 일시적인 개체수 증가로 우점종으로 구분된 젤라틴성 동물플랑크톤인 탈리아류, 요각류인 *Pseudocalanus minutus*, 그리고 *Clausocalanus* spp.는 간헐적 출현으로 증가 혹은 감소경향을 언급하기는 쉽지 않았다.

동물플랑크톤 군집의 평균개체수 증가를 주도한 네

가치 우점분류군의 생태 및 생리학적 특성을 통해 율령도와 독도 주변해역의 미래변화를 가늠해 볼 수 있다. 야광충은 일년 중 여러 번의 생식을 수행하며 먹이스펙트럼이 높고 빠른 성장을 하여 대발생을 나타낸다. 독도 주변에서 관측된 야광충의 증가는 외양의 연구해역이 육지연안역이 겪는 현실을 마주할 가능성이 높음을 의미한다. 야광충은 적조원인종으로서 수온과 염분 그리고 먹이농도가 적절한 조건하에서 급격히 대발생하여, 해수 중 용존산소의 감소, 암모니아 농도증가, 아가미 질식과 독성미세조류를 섭식한 야광충을 먹은 어류의 폐사를 야기한다[20]. 여름철에 점차적으로 수적인 증가를 나타낸 반면, 봄철에 한시적으로 나타난 높은 개체수는 주목할 만하다[Fig. 8]. 지각류인 *P. avirostris*의 출현 염분범위는 담수조건에서 49 psu까지로 매우 넓은 것으로 알려져 있다[21]. 2013년, 2014년 그리고 2015년 여름철에 율령도와 독도주변해역에서 관찰된 출현개체수 증가를 통해 이 시기에 섬으로부터 담수유입 정도가 강했음을 유추할 수 있다. 2013년 여름철 강수량이 2015년에 비해 낮아 낮은 염분을 직접적으로 설명하기가 쉽지 않으나, 이 기간의 강수량이 연구기간 전체평균치 보다 높아, *P. avirostris*의 높은 개체수 출현이 어느정도 설명되었다. 또한 기존에는 해산지각류인 *Evadne spinifera*가 주로 출현했고, 1999년 9월에 출현한 *P. avirostris*의 개체수가 5 inds./m<sup>3</sup>미만임을 볼 때, 최근의 수적인 증가는 예전에 비해 뚜렷함을 알 수 있다[8, 9]. 유형류인 *Oikopleura* spp.는 요각류가 섭식하기 어려운 크기의 초미소(<0.2  $\mu$ m) 및 미소플랑크톤(0.2-20  $\mu$ m)을 효과적으로 섭식할 수 있어, 영양염이 부족한 빈영양 해역에 우점한다[22]. 유형류는 매우 작은 유기물질을 섭식하여 상위영양단계로 직접 전달함으로써 중요한 생태학적 위치를 점한다. 특징적으로 먹이생물을 여과하는 “mucous house”를 주기적으로 떼어내어 버림으로 저층으로의 유기물질 수송에 큰 기여를 하는 것으로도 알려져 있다[23]. 즉 온난화로 인해 수온이 증가하면 전형적인 먹이사슬 구조에서 미소생물환 구조(microbial foodweb)로 바뀌는데, 이러한 조건에서 효과적으로 생존할 수 있는 특성을 갖고 있다. 한편으로는 유형류(*Oikopleura dioica*)의 알과 미성숙체가 대형요각류(*Calanus*속, *Candacia*속, *Centropages*속, *Eucalanus*속, *Candacia*속)에 의해 빈번히 섭식되는데, 연구해역에서 관찰된 유형류의 점차적인 수적증가는 중, 대형요각류의 포식압이

낮아지고 있음을 의미할 수 있다[24].

*Paracalanus parvus* s.l.는 국내연안역에 출현하는 우점종 중에 하나이며[25], 부유생물 먹이망에서 영양학적 중요도가 높다. 또한 주요 먹이원으로 식물플랑크톤 외에 원생동물, 외편모조류와 미소편모조류를 왕성히 섭식한 후 모악류나 치자어에 섭식되어 ‘원생동물-요각류-포식자’의 영양학적 연결의 주요 매개체이기도 하다[26, 27]. *P. parvus* s.l.는 동해 전선역 부근에서 상대적으로 높은 수온의 해역과 수층에서 분포하였고, 11월의 최대 출현개체수는 296 inds./m<sup>3</sup>였다[11]. 그리고 독도 주변해역에서 5월과 9월의 최대 출현개체수는 통틀어 10 inds./m<sup>3</sup> 미만이었다[9]. 뚜렷한 수온증가가 없는 연구기간 동안 나타난 *P. parvus* s.l.의 최대 출현개체수는 과거에 비해 10배 이상 증가하였는데, 이는 먹이생물(엽록소-a)의 농도 증가의 영향 혹은 대마 난류수의 관입강화(intrusion intensification)와 같은 물리적 강제(physical forcing)의 결과로 여겨진다.

## 5. 결 론

독도 인근해역에서 2006년부터 2015년까지 10년간 동물플랑크톤 평균 개체수의 증가가 관찰되었다. 이 중에 채집횟수가 가장 많은 계절인 여름철과 봄철의 동물플랑크톤 개체수를 구분하여 확인한 결과, 증가경향을 나타냈다. 이는 동물플랑크톤의 먹이인 식물플랑크톤의 엽록소-a 농도의 증가와 잠재적 포식자인 주요 어류(멸치, 꽁치, 오징어, 청어, 전갱이)의 감소와 관련이 있는 것으로 나타났다. 장기간 증가를 주도한 우점종은 봄과 여름철에 공히 *Paracalanus parvus* s.l.이었으며, 특히 여름철에는 야광충, 지각류인 *P. avirostris*, 유형류인 *Oikopleura* spp. 그리고 요각류인 *P. parvus* s.l.이었다. 네 종의 생태학적 특성을 통해 독도 주변해역 표층생태계(수온약층 상부)는 아열대특성 해역에서 효과적으로 생존할 수 있는 종으로 점유되었음이 확인되었다. 또한 먹이스펙트럼이 넓은 야광충의 대발생 출현으로 독도 주변해역 생태계가 예전과 다른 환경에 노출되고 있음이 확인되었다. 이로써 본 연구를 통해 기존 간헐적 독도 조사를 통해 도출된 연구결과의 해석한계를 극복하였고, 현재 생태계의 상태를 단순히 기술하는 수준을 넘어 미래변화를 가늠할 수 있는 기초를 제공하였다.

# References

- [1] J.-Y. Na, S.-W. Lee, K.-D. Cho, A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea Peninsula, Journal of the Korean Fisheries Society, vol. 24, no. 4, pp. 215-228, 1991.
- [2] H.-S. Yang, S.-S. Kim, C.-G. Kang, K.-D. Cho, A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea peninsula, Journal of the Korean Fisheries Society, vol. 24, no. 3, pp. 185-192, 1991.
- [3] C. Park, C.R. Lee, J.C.Kim, Zooplankton community in the front zone of the East Sea (the Sea of Japan), Korea: 2. Relationship between abundance distribution and seawater temperature, Journal of Korean Fisheries Society, vol. 31, no. 5, pp. 749-759, 1998.
- [4] Dokdo Ocean and Fisheries Association, The report on the basic study for sustainment of marine environment and fishery resources of the Tokto Area, Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Korea, 544p, 1999.
- [5] Korea Ocean Research & Development Institute, The report on a study on the basic exploration for Dokdo ecosystem, Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Korea, 1,033p, 2000.
- [6] Korea Ocean Research & Development Institute, The report on a sustainable research and development of Dokdo, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea, 792p, 2008.
- [7] J.-H. Kang, W.-S. Kim, K.-I. Chang, J.-H. Noh, Distribution of plankton related to the mesoscale physical structure within the surface mixed layer in the southwestern East Sea, Korea, Journal of Plankton Research, vol. 26, no. 12, pp. 1515-1528, 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/plankt/fbh140>
- [8] S.W. Kim, C.I. Choi, K.I. Yoo, Observations on the biology of a marine cladoceran *Evadne spinifera* in waters adjacent to Ulleung Do and Tok Do Islands in the East Sea, Korea, Korean Journal of Environmental Biology, vol. 14, no. 2, pp. 189-193, 1996.
- [9] J.-H. Kang, W.-S. Kim, J.-H. Shim, Species composition and abundance of zooplankton community in Spring and Autumn around Dokdo, Ocean and Polar Research, vol. 24, no. 4, pp. 407-417, 2002.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2002.24.4.407>
- [10] H.-W. Lee, W.-G. Park, Larval timing and distribution of the red snow crab *Chionoecetes japonicus* near Dokdo, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, vol. 45, no. 6, pp. 716-722, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2012.0716>
- [11] C. Park, J.K. Choi, Zooplankton community in the front zone of the East Sea of Korea (the Sea of Japan): 1. Species list, distribution of dominant taxa, and species association, Journal of Korean Fisheries Society, vol. 30, no. 2, pp. 225-238, 1997.
- [12] J.-H. Kang, M.H. Seo, O.Y. Kwon, W.-S. Kim, Diel vertical migration of the copepod *Calanus sinicus* before and during formation of the Yellow Sea Cold Bottom Water in the Yellow Sea, Acta Oceanologica Sinica. vol. 32, no. 9, pp. 99-106, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13131-013-0357-6>
- [13] D. Roemmich, J. McGowan, Climate warming and the decline of zooplankton in the California current, Science, vol. 267, pp. 1324-1326, 1995.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.267.5202.1324>
- [14] H.M. Verheye, A.J. Richardson, Long-term increase in crustacean zooplankton abundance in the southern Benguela upwelling region (1951-1996): bottom-up or top-down control?, ICES Journal of Marine Science, vol. 55, pp. 803-807, 1998.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jmsc.1998.0387>
- [15] J. Flinkman, E. Aro, I.Vuorinen, M.Viitasalo, Changes in northern Baltic zooplankton and herring nutrition from 1980s to 1990s: top-down and bottom-up processes at work, Marine Ecological Progress Series, vol. 165, pp. 127-136, 1998.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3354/meps165127>
- [16] C. Möllmann, G. Kornilovs, L. Sidrevics, Long-term dynamics of main mesozooplankton species in the central Baltic Sea, Journal of Plankton Research, vol. 22, no. 11, pp. 2015-2038, 2000.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/plankt/22.11.2015>
- [17] R.A. Clark, C.L.J. Frid, K.R. Nicholas, Long-term, predation-based control of a central-west North Sea zooplankton community, ICES Journal of Marine Science, vol. 60, pp.187-197, 2003.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1054-3139\(02\)00253-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1054-3139(02)00253-9)
- [18] C. Lin, J. Su, B. Xu, Q. Tang, Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem, Progress in Oceanography, vol. 49, pp. 7-19, 2001.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6611\(01\)00013-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6611(01)00013-1)
- [19] J.-H. Kang, W.-S. Kim, H.J. Jeong, K.Shin, M.Chang, Why did the copepod *Calanus sinicus* increase during the 1990s in the Yellow Sea?, Marine Environmental Research, vol. 63, pp. 82-90, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2006.05.005>
- [20] J.-H. Kang, Distributional characteristics and carrying capacity of the potentially risky species *Noctiluca scintillans* at international Korean seaports, Ocean and Polar Research, vol. 32, no. 4, pp. 449-462, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2010.32.4.449>
- [21] J.H. Lochhead, On the distribution of a marine cladoceran, *Penilia avirostris* DANA (Crustacea, Branchiopoda), with a note on its reported bioluminescence, Biological Bulletin, vol. 107, no. 1, pp. 92-105, 1954.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/1538633>
- [22] S.I. Uye, S. Ichino, Seasonal variations in abundance, size composition, biomass and production rate of *Oikopleura dioica*(Fol)(Tunicata: Appendicularia) in a temperate eutrophic inlet, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, vol. 189, pp. 1-11, 1995.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-0981\(95\)00004-B](http://dx.doi.org/10.1016/0022-0981(95)00004-B)
- [23] F. Sommer, T. Hansen, H. Feuchtmayr, B. Santer, N. Tokle, U. Sommer, Do calanoid copepods suppress appendicularians in the coastal ocean?, Journal of Plankton Research, vol. 25, no. 7, pp. 869-871, 2003.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/plankt/25.7.869>
- [24] Á. López-Urrutia, R.P. Harris, T.Smith, Predation by calanoid copepods on the appendicularian *Oikopleura dioica*, Limnology and Oceanography, vol. 49, no. 1, pp.



303-307, 2004.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2004.49.1.0303>

- [25] S.Y. Moon, H.-J. Oh, H.Y. Soh, Seasonal variation of zooplankton communities in the southern coastal waters of Korea, *Ocean Polar Research*, vol. 32, no. 4, pp. 411-426, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2010.32.4.411>
- [26] K. Suzuki, Y. Nakamura, J. Hiromi, Feeding by the small calanoid copepod *Paracalanus* sp. on heterotrophic dinoflagellates and ciliates, *Aquatic Microbial Ecology*, vol. 17, pp. 99-103, 1999.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3354/ame017099>
- [27] R. Giesecke, H.E. González, Reproduction and feeding of *Sagitta enflata* in the Humboldt Current system off Chile, *ICES Journal of Marine Science*, vol. 65, pp. 361-370, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/icesjms/fsn030>

## 권 오 윤(Oh Youn Kwon)

[정회원]



- 2006년 2월 : 상명대학교 생물학과 (이학석사)
- 2013년 2월 : 상명대학교 생물학과 (박사수료)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구사업인력

<관심분야>

해양생물학, 식물플랑크톤 생태학

## 강 정 훈(Jung-Hoon Kang)

[정회원]



- 1998년 2월 : 서울대학교 해양학과 (이학석사)
- 2004년 8월 : 서울대학교 지구환경과학부 (이학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원
- 2014년 9월 ~ 현재 : UST 교수

<관심분야>

해양생물학, 외래생물생태학

## 조 규 희(Kyuhee Cho)

[정회원]



- 2004년 2월 : 용인대학교 생명과학과 (이학석사)
- 2011년 2월 : 한양대학교 생명과학과 (이학박사)
- 2015년 11월 ~ 현재 : (주)엔비언트 책임연구원

<관심분야>

해양생물학, 동물플랑크톤 분류 및 생태

## 김 웅 서(Woong-Seo Kim)

[정회원]



- 1984년 8월 : 서울대학교 대학원 해양학과 (이학석사)
- 1993년 2월 : 뉴욕주립대학교 해양과학과 (이학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원
- 2005년 9월 ~ 현재 : UST 교수

<관심분야>

해양생물학, 동물플랑크톤, 심해생물