

〈Original article〉

2016년 춘계 울릉도-독도주변해역에서 동해 연안 용승과 시간차에 의한 일차생산력 영향

백 승 호 · 김 윤 배^{1,*}

한국해양과학기술원 위해성분석연구센터, ¹한국해양과학기술원 울릉도·독도해양연구기지

Influences of Coastal Upwelling and Time Lag on Primary Production in Offshore Waters of Ulleungdo-Dokdo during Spring 2016

Seung Ho Baek and Yun-Bae Kim^{1,*}

South Sea Research Institute, KIOST, Geoje 53201, Republic of Korea

¹Ulleungdo·Dokdo Ocean Science Station, KIOST, Ulleungdo 40205, Republic of Korea

Abstract - In order to investigate the upwelling and island effects following the wind storm events in the East Sea (i.e., Uljin-Ulleungdo-Dokdo line) during spring, we assessed the vertical and horizontal profiles of abiotic and biotic factors, including phytoplankton communities. The assessment was based on the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) and field survey data. A strong south wind occurred on May 3, when the lowest sea level pressure (987.3 hPa) in 2016 was observed. Interestingly, after this event, huge blooms of phytoplankton were observed on May 12 along the East Korean Warm Current (EKWC), including the in the offshore waters of Ulleungdo and Dokdo. Although the diatoms dominated the EKWC area between the Uljin coastal waters and Ulleungdo, the population density of raphidophytes *Heterosigma akashiwo* was high in the offshore waters of Ulleungdo-Dokdo. Based on the vertical profiles of Chlorophyll-*a* (Chl. *a*), the sub-surface Chl. *a* maximum appeared at 20 m depths between Uljin and Ulluengdo, whereas relatively high Chl. *a* was distributed equally across the entire water column around the waters of Ulleungdo and Dokdo islands. This implies that the water mixing (i.e., upwelling) at the two islands, that occurred after the strong wind event, may have brought the rapid proliferation of autotrophic algae, with nutrient input, to the euphotic layer. Therefore, we have demonstrated that a strong south wind caused the upwelling event around the south-eastern Korean peninsula, which is one of the most important role in occurring the spring phytoplankton blooms along the EKWC. In addition, the phytoplankton blooms may have potentially influenced the oligotrophic waters with discrete time lags in the vicinity of Ulleungdo and Dokdo. This indicates that the phytoplankton community structure in the offshore waters of Ulleungdo-Dokdo is dependent upon the complicated water masses moving related to meandering of the EKWC.

Keywords : coastal upwelling, strong wind event, spring phytoplankton bloom, satellite imagery

* Corresponding author: Yun-Bae Kim, Tel. 054-791-8402,
Fax. 054-791-8409, E-mail. dokdo512@kiost.ac.kr

서론

동해는 한반도, 일본, 러시아 대륙으로 둘러싸인 반폐쇄성 해역으로, 수심 200 m보다 얕은 대한 해협, 쓰가루 해협, 소야 해협, 타타르 해협을 통해 동중국해, 북태평양, 오호츠크해와 연결되어 해수가 순환되고 있다. 동해 평균수심과 최대수심은 각각 1,684 m와 4,049 m로, “작은 대양”이라고 불릴 만큼 대순환 형태의 상층순환이 존재하며, 다양한 해양 현상들이 일어나, 축소판 대양으로 간주되고 있다(Ichiye 1984). 동해 울릉도 및 독도해역은 동한난류와 동해북부 기원의 한류수에 의해 형성되는 극전선 해역에 위치하며, 난류와 한류가 교차함에 따라 동한난류의 사행 및 난수성 소용돌이, 냉수성 소용돌이가 그리고 섬 주변에서의 해양혼합 등 다양한 현상이 빈번하게 발생한다(Mitchell *et al.* 2005; Hyun *et al.* 2009; Kim *et al.* 2014).

한반도는 4계절이 뚜렷한 온대해역으로서 계절적 광주기, 광량 및 수온변화에 따라서 식물플랑크톤 군집구조 및 종 천이양상이 명확하게 나타난다(Baek *et al.* 2015; Lee *et al.* 2016; Lim and Baek 2017). 온대해역에서 식물플랑크톤의 대발생은 춘계와 추계에 잘 알려져 있고, 춘계에는 동계 수층혼합으로 공급된 영양염이 일사량 증가와 함께 대발생이 일어나며, 추계에는 하계 고갈된 영양염이 표층 주변의 온도하강에 의한 성층이 완화되어 저층으로부터 재차 공급되는 영양염에 기인하는 것으로 알려져 있다. 유광층내 영양염류분포는 식물플랑크톤 증식과 소멸을 조절하는 중요한 인자이며, 이는 생화학적 과정으로 퇴적물에서 유출되거나, 저층에서 물리적 현상으로 유광층 상부로 운반된다. 또한 영양염류의 일부는 해수 중으로 환원 과정을 거쳐 재용출 되기 때문에 보존성이 약하며, 순환경로 및 거동이 매우 복잡하게 작용된다. 따라서 영양염류의 거동은 생물학적 요인과 더불어 비생물학적 요인과 결부시켜 그 특성을 파악하는 것이 중요하다.

이와 관련하여 동해에서 진행된 연구는 주로 해류 순환 및 물리구조(Chang *et al.* 2002; Mitchell *et al.* 2005), 영양염 거동(Kim *et al.* 2012; Lee and Rho 2013), 연안 용승에 따른 박테리아와 미소생물군집변화(Hyun *et al.* 2009), 인공위성을 활용한 연안 용승과 일차생산의 관계(Yoo and Kim 2004; Yoo and Park 2009), 폭풍우 풍향과 풍속에 따른 식물플랑크톤의 반응(Kim *et al.* 2007; Baek *et al.* 2018), 영양염첨가에 따른 식물플랑크톤 성장반응(Baek *et al.* 2016; Baek *et al.* 2018), 식물플랑크톤 군집구조(Kim *et al.* 2014; Lee and Jang 2014; Lee *et al.* 2016) 등이 있다. 특히 동해 광역해역에서 2001년부터 2010년까지의 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)로 측정된 월별 평균 엽록소 *a*값

에 의하면 (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>), 1~3월은 식물플랑크톤 생산성이 낮게 유지되었고, 봄철인 3~5월에 춘계 식물플랑크톤의 대발생이 일어났다. 특히, 6~8월 하계에는 낮은 엽록소를 유지하였고, 9월부터 동해 남서부 연안역에서 식물플랑크톤의 생산성이 점차적으로 증가하여 11~12월에 동해 중부 해역까지 광범위하게 일정량 유지되는 특성을 보였다(Lee and Jang 2014; 월별 위성기반 엽록소 평균 이미지 제공). 즉 온난해역인 동해에서는 춘계 식물플랑크톤의 대발생이 광역에 걸쳐 주기적으로 발생하고, 추계에는 연안해역에서 가까운 대륙붕 근처에서 국부적으로 소규모 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 이전의 연구는 동해 전체 및 동해 남서 및 중부 해역의 일차생산성이 한반도 남동해역의 연안 용승에 의하여 일정하게 공급된 영양염류에 의존적인 것으로 확인되고 있다(Hyun *et al.* 2009; Baek *et al.* 2018). 아울러, 동해 남서부 해역에서 동한난류가 동해 남서부 연안을 따라 북상하면서 연안해역에서 번성한 식물플랑크톤이 동한난류에 편승하여 동해 중부해역까지 1차생산력에 기여하는지 명확하게 파악하기 위해서는 각 해역별 식물플랑크톤의 군집에 대한 조사가 필수적이다. 하지만, 지금까지의 대부분의 연구는 연안과 가까운 대륙붕 주변해역에서 식물플랑크톤의 군집구조에 집중되어 있어, 동해 외양까지 광역해역에 걸쳐 식물플랑크톤의 공간적인 분포양상에 관한 연구는 극히 미미한 실정이다. 특히 동해 남서부해역의 연안 용승에 의하여 반응한 식물플랑크톤이 해류에 편승하여 울릉도-독도 외측해역으로 확산되는지, 또는 울릉도-독도해역의 섬효과(Island Effect; 섬주변에서 물리적 수괴혼합에 의하여 영양염류가 유광층에 공급되어 생물생산성이 높아지는 현상)에 의하여 자체적으로 특정종이 대발생과 함께 동한난류에 포함된 생물과 혼합되어, 공간적으로 이동하면서 동해 중부 해역의 일차생산에 기여하는지 명확하지 않은 실정이다.

본 연구에서는 Baek *et al.* (2018)에서 제시한 결과에 근거하여 강한 바람에 의한 연안 용승 및 섬효과를 구체적으로 파악하기 위해서 춘계 강한 저기압 통과 전후를 대상으로 식물플랑크톤의 군집조사와 함께 해양환경 및 물리적인 수직 구조의 특성을 파악하고자 한다. 특히, 울진-울릉도-독도 주변해역에서 선행 보고된 식물플랑크톤 군집조성과 함께 인공위성자료에 의한 엽록소의 광역분포 특성을 비교하여 동해 남서부해역에서 일차생산기여 및 시간차 변성 특성에 초점을 두었다. 또한 한반도 남동해역에서 기인된 용승에 의하여 발생한 식물플랑크톤이 동한난류에 편승해 이루어 울릉도 독도 주변에 미치는 영향과 함께 섬효과에 의한 내용을 심도있게 토의하고자 한다.

재료 및 방법

현장조사는 한국해양과학기술원 연구조사선 장목2호를 이용하여 2016년 5월 2일부터 8일까지 총 7일에 걸쳐 수행되었다. 먼저 5월 2일 경상북도 울진 후포항을 출항하여 정점 DY1에서 DY7까지 조사한 후 울릉도 현포항에 입항하였다. 그 후 5월 3일은 풍랑주의보로 현장조사를 수행할 수 없었고, 5월 4일 오후 울릉도 주변을 조사하였으나, 5월 5일은 기상악화로 조사를 수행할 수 없었다. 그 후 5월 6~7일은 울릉도에서 독도로 이어지는 구간을 조사하였다(Fig. 1). 수환경요인은 장목2호에 장착된 CTD (SBE911plus)를 활용하여 표층에서 최대 450 m까지 수심별 수온, 염분, 형광값(식물플랑크톤의 현존량)을 측정하였다. 식물플랑크톤의 군집조성은 표층수를 버킷으로 채수한 뒤, 현장 선상에서 500

mL의 표층수에 Lugol's solution (Sournia 1978)을 넣어 최종 농도 3%로 고정하였고, 실험실에서 500 mL 시료를 50 mL로 농축시켰다. 식물플랑크톤의 현존량 및 종조성은 농축된 시료를 Sedgewick-Rafter counting chamber에 200~500 μ L 분주하여 광학현미경하(100~400배 배율)에서 분석하였다. 특히 광학현미경 (Axioplane, Zeiss, Germany)에서 동정이 극히 어려운 종은 속 수준에서 동정하였으며, 10 μ m 이하의 매우 작은 와편모조류는 하나의 미동정 와편모그룹으로 묶었고, 은편모조류(Cryptophyceae) 또한 하나의 은편모그룹으로 묶어 동정 및 계수하였다.

강풍에 의한 연안 용승 및 섬효과를 구체적으로 파악하기 위해서 춘계 강한 저기압 통과 직후인 2016년 4월 10일부터 5월 20일까지 매일 한국해양과학기술원 GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) 위성으로 동해 광역해역의 엽록소(1차 생산) 분포자료를 얻었다(<http://kosc.kiost.ac.kr>). 아울러, 2016년 4월 1일부터 5월 30일에 걸쳐 기상청 동해해양기상부이에서 관측된 30분 간격의 대기압, 풍향, 풍속, 최대파고 등을 활용하였다. 해양기상부이는 울릉도에서 서쪽으로 약 75 km 떨어져 있고, 정점 DY4로부터 약 29 km 북쪽에 위치하고 있다(Fig. 1. 검정 + 심볼 참조).

결과 및 고찰

해양환경 특성

Fig. 2는 인공위성에서 관측된 표면 수온과 수온 분포로부터 계산된 표층 유속 분포를 나타내었다. 대한해협 주변으로는 표층 수온이 15~17°C 분포를 보였으며, 북상하면서 점차 수온이 낮아져 38~40°N 해역은 8~13°C 분포를 나타낸다.

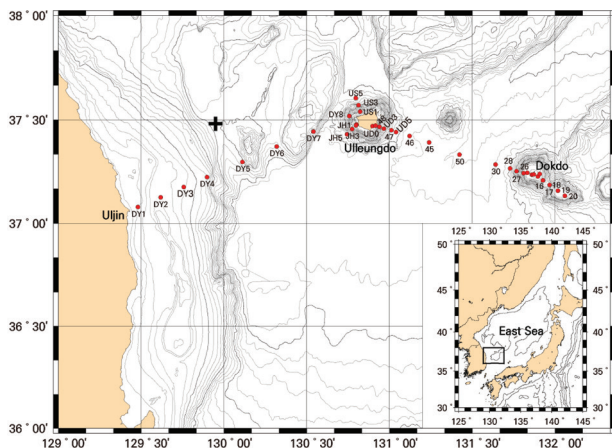


Fig. 1. Locations of sampling sites between Uljin and Dokdo in East Sea, Korea. The black cross implies the Donghae Ocean Data Buoy, KMA.

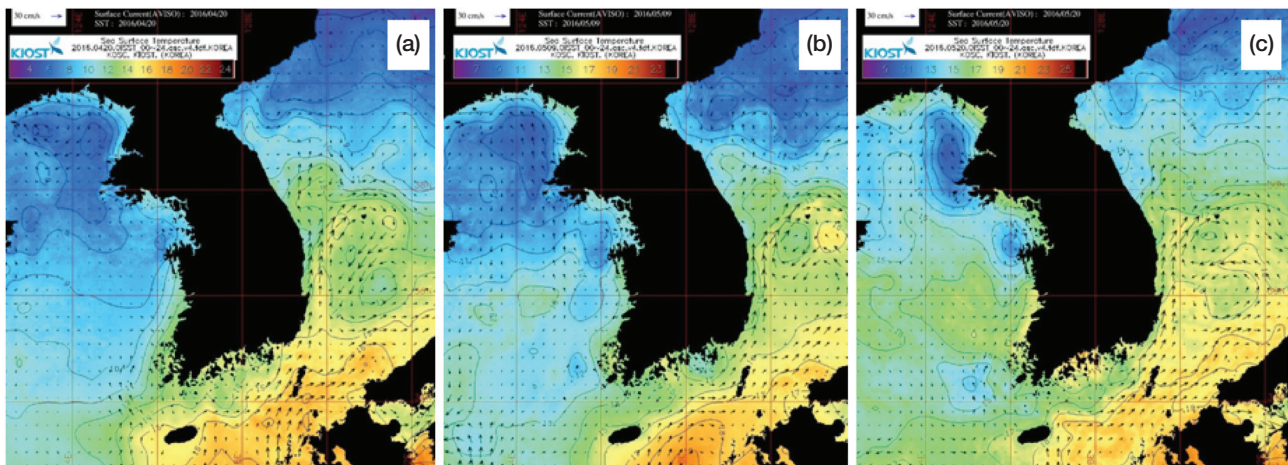


Fig. 2. Satellite-derived sea surface temperature and geostrophic surface velocities for (a) April 20, (b) May 9 and (c) May 20, 2016.

특히 38°N 주변해역에서는 남쪽의 난류수와 북쪽의 한류수가 만나면서 극전선역이 형성되고 있음을 알 수 있다. 본 조사기간 동안 대마 난류 기원 동한난류는 부산, 기장, 감포, 구룡포, 울진에 걸쳐 북상하여, 정점 DY1~DY2에서 우측으로 선회하여 울릉도방향으로 움직였고, 특히 울릉도 북쪽 38°N 선에서 역포물선 변곡점을 형성하면서 다시 남하하여 독도인근으로 흐르는 특성을 보였다. 또한 울릉도-독도주변해역에서 시계 방향으로 회전하는 울릉 난수성 소용돌이(Ulleung Warm Eddy) 구조와 함께 울릉도 남서쪽으로 또 하나의 소용돌이 구조가 형성되고 있다(Fig. 2b). 일반적으로 해류의 흐름에 따라서 대마난류기원의 동한난류는 울릉도-독도해역까지 확산되는 것이 빈번하게 보고되었고(Hyun *et al.* 2007; Kim *et al.* 2007; Kim *et al.* 2012), 특히 동한난류와 북한한류가 만나는 북위 38°N 근처에서 극전선을 형성하여 1차 생산이 높게 유지된다는 보고가 있다(Gong and Son 1982; Mooers *et al.* 2005). 본 조사시기에도 이전의 연구와 유사하게 해류에 따른 수온 전선이 울릉도 북쪽 38°N에서 명확하게 구분되는 특성을 보였고, 이러한 수온 전선의 형성은 식물플랑크톤의 집적을 용이하게 하여, 식물플랑크톤의 높은 개체수밀

도를 유지하는 데 유리하게 작용된다. 즉 수온전선은 연구해역의 식물플랑크톤 개체수 밀도뿐만 아니라 군집조성에도 일정하게 영향을 미칠 것으로 생각된다. 하지만, 최근 기후변화에 의한 동해 해류 분포의 변화에 따라 가끔씩 북위 40°N 근처에서 수온 전선이 형성되는 시기가 있어, 추후 지속적으로 수온 전선대 형성 위치를 모니터링할 필요가 있다.

한반도 남동해역에서는 주로 춘계와 하계에 걸쳐 지역적으로 활발한 연안 용승이 보고되어 왔으며, 연안 용승에 따른 동해 연안해역의 영양염분포 특성과 식물플랑크톤의 번성에 관한 다양한 연구가 진행되었다(Kim *et al.* 2007; Hyun *et al.* 2009; Kim *et al.* 2014). 이러한 연안 용승은 남풍 계열의 바람이 3~4일 이상 지속적으로 강하게 우점할 때 해저 지형적 영향으로 동해, 울진, 포항, 울산, 기장, 부산, 거제도 해역에서 주로 발생한다. 본 연구에서도, 5월 3~7일 사이 남풍계열의 바람이 우점하였고, 특히 5월 3일에는 최저 987.3 hPa 규모의 강한 저기압이 관측 해역을 통과하였고, 최대 24.2 m s^{-1} 의 순간풍속과 최대 8.5 m의 최대 파고가 관측되었다(Fig. 3). 결과적으로 5월 3~4일 강한 남풍의 영향으로 한반도 남동해역에서 연안 용승이 발생하였고, 아울러, 연안

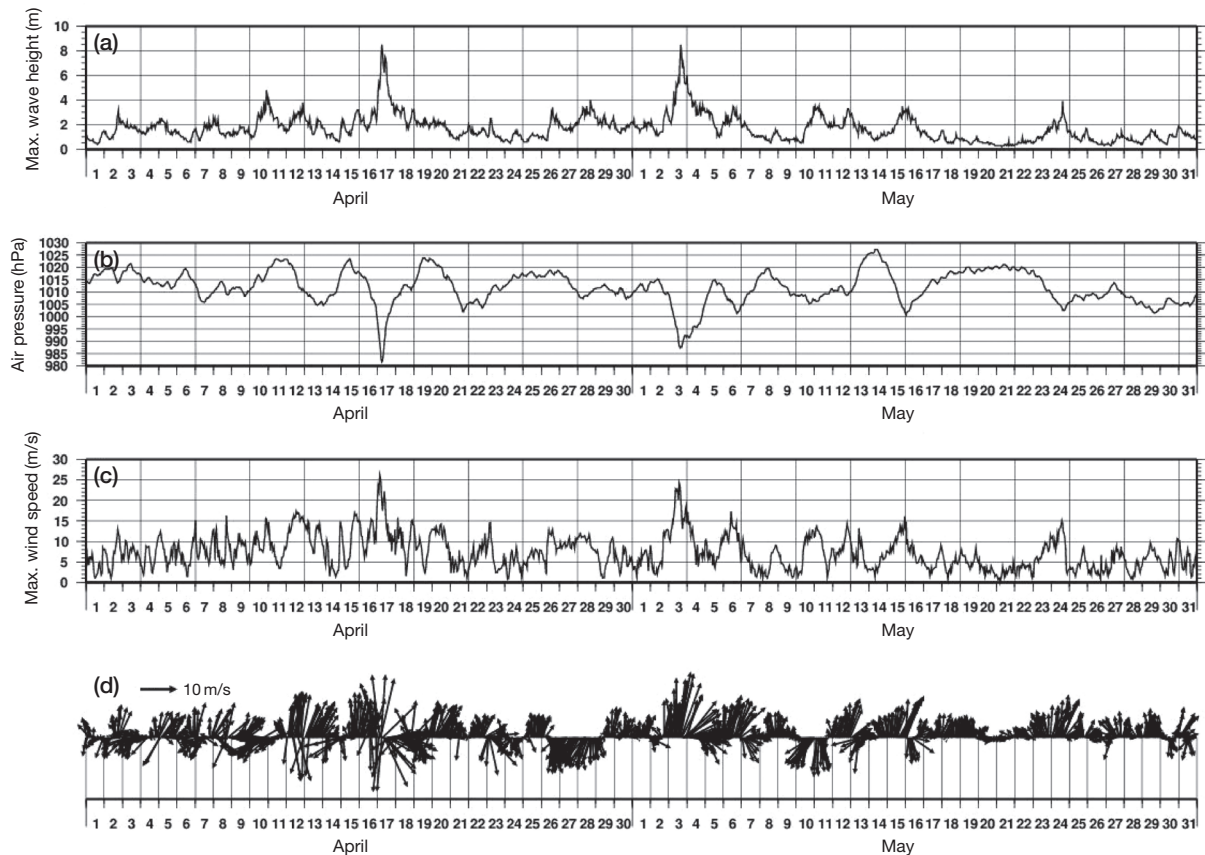


Fig. 3. Time series of: (a) maximum wave height (m); (b) air pressure, (c) maximum windspeed (m/s); and (d) wind direction (m/s) between 1 April and 31 May 2016 at the Donghae Ocean Data Buoy (Korea Meteorological Administration).

용승에 의해 대발생한 식물플랑크톤이 울릉도와 독도로 이동하면서 울릉도와 독도 주변의 섬효과에 의하여 식물플랑크톤의 대발생이 가속화된 것으로 고려된다. 실제, 국립수산물학원의 자료에 의하면 (<http://www.nifs.go.kr>), 2016년 5월 4일 경북 울진~강원도 양양 연안에서 강풍에 의한 하층수와 의 강한 연직 혼합의 결과로 지역별로 4~7°C 정도 급격한 표층수온 하강이 나타났고, 이는 유광층 하부의 저수온 수괴가 표층으로 공급되면서 영양염류와 함께 저수온현상을 초래하는 연안 용승의 흔적을 제시할 수 있는 명확한 근거라고 판단된다. 특히, 이벤트성 강풍에 의한 용승은 유광층 상부에 영양염류를 공급시켜 식물플랑크톤의 증식을 유도하였고, 함께 공급된 영양염류는 식물플랑크톤 증식에 소모될 뿐만 아니라, 대륙붕 바깥으로 확산되면서 영양염류가 희석되어 점차적으로 낮게 유지될 가능성이 높다 (Hyun *et al.* 2007). 하지만, 본 조사기간 동안 연안에서 200 km 정도 떨어진 독도 인근해역에서 높은 엽록소 값이 관찰되었다. 이는 동해 남부해역의 연안 용승에 의하여 확산된 식물플랑크톤의 번성과 함께 울릉도와 독도 주변의 섬효과에 의한 상하층 혼합 영향으로 중층수의 높은 영양염류가 유광층으로 공급되어 대증식한 결과로 사료된다 (Kim *et al.* 2011; Baek *et al.* 2018). 즉 외양인 독도 주변에서 일시적으로 식물플랑크톤의 대발생은 섬효과에 의하여 저층으로부터 공급되는 영양염류가 일정부분 기여한 것으로 판단된다. 결과적으로 섬 주변에서 강한 바람의 생성은 섬 주변의 물리적 혼합을 유도할 수

있고, 그 결과 유광층 하부에서 상부로 영양염류의 공급을 가져와 일차생산의 증대를 야기하는 이른바 “섬효과(Island Effect) 현상”이 울릉도 및 독도 주변해역에서 빈번하게 발생할 수 있다는 것을 시사할 수 있다.

Fig. 4는 2016년 5월 2~9일 동안에 측정된 울진 죽변연안(DY1)-울릉도(DY8)-독도 동쪽(정점 20) 단면의 수심별 수온, 염분, 엽록소 형광값 분포를 나타내었다. 현장 관측은 울진 죽변연안(정점 DY1)-울릉도 단면인 DY1~DY8 정점은 (DY3, DY5, DY7은 강한 저기압 통과 이후인 5월 9일 관측)은 5월 2일에, 그리고 울릉도-독도 동쪽 단면은 강풍 시기 이후인 5~8일에 걸쳐 이루어졌다. 표층수온은 울진 연안해역에서 13.0°C인 반면에, Fig. 2의 표층수온 분포로 볼 때 동한난류의 주축의 영향을 주로 받는 DY5에서는 16.2°C로 높게 관찰되었고, 울릉도-독도에서는 조금 낮은 15°C 전후로 관찰되었다. 수온의 연직 구조를 살펴보면, 10°C 등온선 깊이는 울진연안의 DY1에서 20 m로 나타났으나, 울릉도 주변해역(DY8, UD1~UD5)에서는 등온선이 약 130 m로 크게 깊어졌다. 특히 울릉도-독도 사이의 정점 46에서 10°C 등온선이 83 m로 얕아졌으나, 독도 섬 주변 정점 27에서는 다시 180 m 근처까지 깊어지는 특성을 보였다. 울릉도-독도 해역에서 10°C 등온선이 깊어진 이유와 관련하여 울릉도 주변에 발달한 시계방향의 난수성 소용돌이에 의한 영향을 고려해 볼 수 있다 (Fig. 2).

염분의 연직 분포는 수온 분포와 전반적으로 유사하며, 울

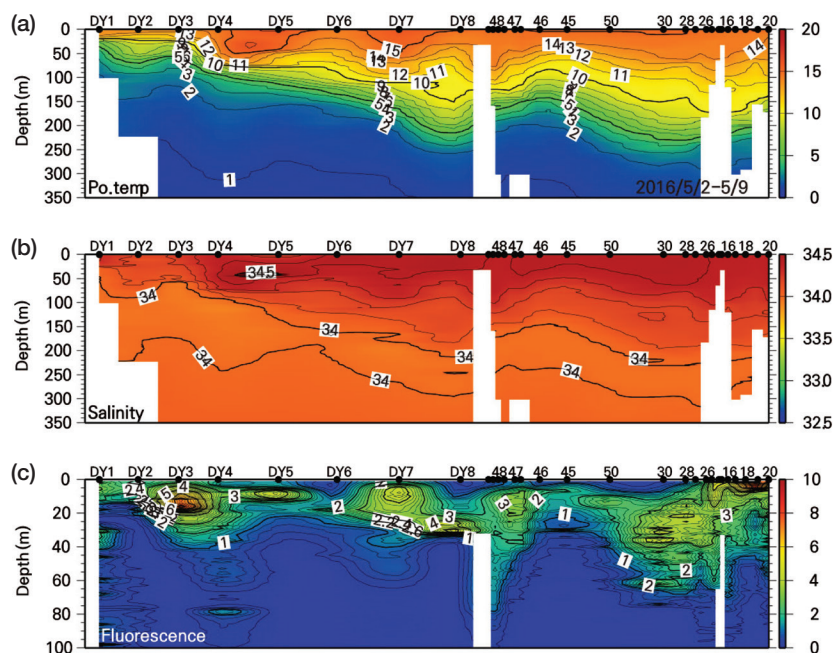


Fig. 4. Vertical distribution of: (a) temperature (°C), (b) salinity (psu) and (c) Chl-a (CTD fluorescence values; mg m^{-3}) at the sampling stations in the East Sea. White bars in the center and right areas indicate Ulleungdo and Dokdo islands, respectively.

진 연안 근처인 DY1~DY3을 제외하고 34.3 psu 이상의 비교적 고염의 해수가 100 m 이내의 수층에서 단면의 전 정점에 걸쳐 관측되었다. 특히, 단면에 걸쳐 가장 고온의 표층수온이 관측된 DY5 정점의 수심 40 m 근처에서 34.5 psu로 가장 높은 염분이 나타나 동한난류의 주축에 의한 영향을 고려할 수 있다. 기존의 연구 결과에서 34.06 psu 미만의 염분과 염분최소층 그리고 비교적 높은 용존산소량을 특성으로 하는 동해 북쪽 기원의 동해중층수 혹은 북한한류수는 울진 연안에서는 150 m 내외로 비교적 얇게, 울릉도-독도 단면에서는 250 m 내외로 깊게 형성하며 상층의 고염수 아래층으로 분포하는 것으로 확인되었다.

엽록소 형광값의 연직 분포의 경우, 울진-울릉도 단면의 경우 정점 DY3, DY5, DY7의 수심 20 m 이내의 상층에 상대적으로 높은 값이 관측된다. 이러한 정점은 흥미롭게도 모두 강한 저기압이 통과한 후에 관측된 정점들이다. 또한 정점 DY4의 경우, 강한 저기압의 통과 전(5월 2일)과 통과 후(5월 9일)에 비교관측을 하였는데, 저기압 통과 전에는 표층 바로 아래층(8~22 m)에 엽록소 최대층이 형성된 반면에, 통과 후에는 표층 근처에(수심 8 m 내외)에서 저기압 통과 전보다 상대적으로 높은 값이 관측되었다(김윤배 미공개 자료). 저기압 통과 후에 관측된 울릉도 동쪽 정점의 경우에서도 수심 20 m 근처를 중심으로 높은 형광값이 관측되었다. 또한 독도 주변해역인 정점 30에서 정점 20까지의 단면에서도 0~40 m 수심대에서 비교적 높은 엽록소 형광값이 나타났다. 특히, 울진-울릉도 단면과 울릉도-독도 단면의 엽록소 형광값 분포 차이점은 울진-울릉도 단면의 경우, 주로 30 m 상층에 높은 형광값이 분포하지만, 울릉도-독도 단면의 경우 섬 근처에서 비교적 형광값이 높으며 또한 높은 형광값의 분포 수심도 상대적으로 깊어진 특성을 갖는다. 이러한 엽록소 형광 분포는 강한 저기압이 관측 해역을 통과함에 따라 강한 연직 혼합에 의해 혹은 강한 해류와 섬 주변의 지형적 특성에 의해 발생하는 섬효과에 의하여 저층의 영양염류가 유광층으로 공급되어 섬 주변의 상층 전 수층에 걸쳐 식물플랑크톤이 빠르게 반응한 결과라고 판단된다.

현장 조사 전 4월 29일에 위성사진을 살펴보면(Fig. 5), 동해 연안 주변을 포함한 울릉도-독도 주변해역에서 2 mg m^{-3} 로 넓은 영역에서 일정하게 식물플랑크톤 엽록소가 관찰되었다. 5월 5에는 동해 중앙부근에서 광범위하게 높게 나타난 엽록소는 일주일 전 동해-울릉도-독도에 걸쳐 일정하게 나타난 엽록소가 해류에 편승해 공간이동하면서 성장하여 높게 유지된 것으로 판단된다. 현장조사 3주 후인 5월 17일에는 동해 중앙부근의 엽록소는 1 mg m^{-3} 전후로 일정하게 낮게 유지되었으며, 5월 5일 동해 중앙해역(울릉도 북동쪽 300~400 km)에서 관찰되었던 5 mg m^{-3} 전후의 높은 엽록소를 지속적

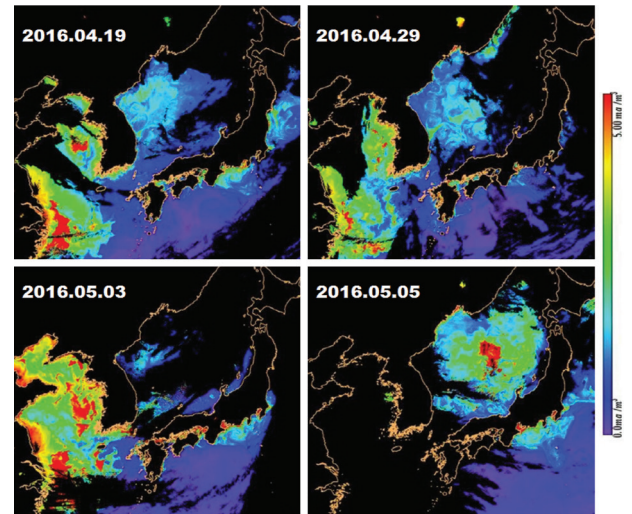


Fig. 5. Short-term variability in Chl. *a* concentration processed by GDPS in the East Sea from GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) on 19 April (upper left), 29 April (upper right), 3 May (lower left) and 5 May (lower right) in 2016.

으로 관찰되지 않았다. 흥미로운 것은 5월 11일에 추가적으로 동해 연안해역에서 엽록소가 일정하게 나타났고, 그 후 1일 경과된 5월 12일에는 포항-울진-울릉도-독도 주변까지 역포물선의 형태로 5 mg m^{-3} 의 높은 엽록소가 관찰되었다. 즉 5월 12일 관찰된 높은 엽록소는 앞서 언급한 것과 같이 5월 2일에 관찰된 강한 저기압 통과 후 지속적으로 남풍계열의 바람이 우점에 의한 동해 연안의 용승효과와 더불어 시간차에 의한 식물플랑크톤의 대발생이 생성된 것으로 판단된다. 아울러 해류에 편승하여 공간 이동된 식물플랑크톤은 울릉도-독도 주변의 섬효과에 의한 영양염류가 유광층 상부로 공급된 것이 일정하게 기여하여, 울릉도-독도 주변해역에 걸쳐 높은 엽록소가 지속적으로 유지된 것으로 판단되었다.

특히, 위성에서 관찰된 5월 11일과 12일의 엽록소와 더불어, 5월 17일과 18일의 위성이미지 영상을 파악하면(Fig. 6), 동해 연안(울진)-울릉도-독도로 이어지는 해역에서 식물플랑크톤이 증식하면서 공간이동 및 확산하는 것을 명확하게 파악할 수 있었다. 특히, 울릉도-독도해역에서는 점차적으로 식물플랑크톤이 확산되면서 일정량 희석되는 경향을 보였다. 결과적으로 위성자료를 바탕으로 대마난류기원 동한난류의 영향으로 엽록소가 공간적으로 이동되면서 1일차의 간격으로 증식하는 특성을 규명할 수 있었다. 즉 해류에 의한 수평 이동과 함께 식물플랑크톤이 증식하여, 해역에 따라서는 5 mg m^{-3} 전후의 높은 엽록소의 확장공간이 잘 반영되어 나타났다. 광역해역에서 위성엽록소의 공간 이미지 영상을 확보하기 위해서는 지정된 해역에서 구름이 없고, 화창한 날씨에만 관찰할 수 있는 단점이 있으나, 공간적으로 광역해역

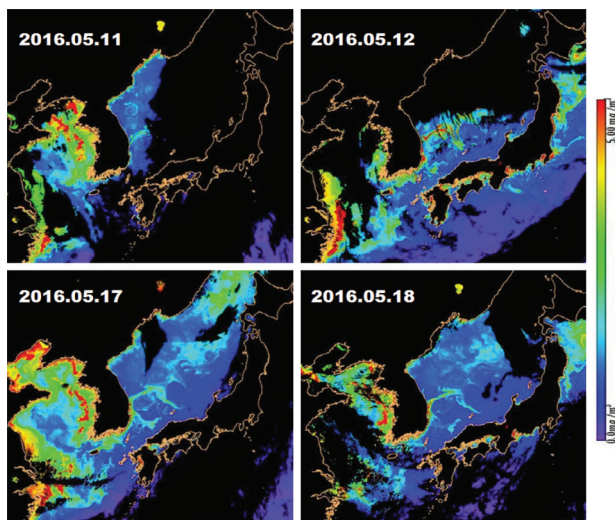


Fig. 6. Short-term variability in Chl. *a* concentration processed by GDPS (GOCI Data Processing System) in the East Sea from GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) on 11 May (upper left panel), 12 May (upper right panel), 17 May (lower left panel) and 18 May (lower right panel) in 2016.

에 식물플랑크톤의 1차 생산의 분포 특성과 함께, 해류의 흐름과 연동시켜 식물플랑크톤의 증식 특성을 명확하게 규명할 수 있는 장점이 있다. 아울러, 5월 3일 강한 강풍 후 지속적으로 구름이 관찰되어, 이후 1주일 동안 위성엽록소 이미지를 확보할 수 없었지만, 5월 11일과 12일에는 광역에 걸쳐서 엽록소 이미지 영상을 명확하게 구분할 수 있었다. 추가로 5월 17일과 18일에 위성이미지 영상이 명확하게 구분된 것은 구름이 관찰되지 않았다는 것을 의미할 수 있고, 이는 5월의 높은 광량이 광역해역에 걸쳐 2일간 지속적으로 유지되어, 대만난류와 동한 난류의 영향에 의한 해류의 공간이동과 함께 지속적으로 식물플랑크톤이 빠르게 증식한 흔적을 명확하게 구분할 수 있었다.

Liu and Chai (2009)가 1994년부터 2001년까지 정리한 연구결과에 의하면, 춘계 3월과 4월에 동해 중앙부와 남부 지역에서 Chl. *a*가 천천히 증가하여 5월에 동해 전반에 걸쳐 광역분포하였고, 그 후 시간경과와 해류 흐름에 따라서 공간적으로 다양한 분포특성을 보고하였다. Kim *et al.* (2007) 연구에서도 동해에서 춘계 강한 폭풍(남풍계열)이 발생한 후 1~2주의 시간차(time lag)를 두고 식물플랑크톤의 대발생을 보고하였고, 특히, 강한 바람을 동반한 수층혼합은 식물플랑크톤의 수직분포의 임계심도를 깊게 하여 표층부 집적을 둔화시켜, 대발생 (bloom)을 지연시키는 중요한 역할을 한다고 시사하였다. 결과적으로 본 조사시기 5월 7일에 독도 인근에서 높은 엽록소가 관찰된 것은 5월 2일에 통과한 저기압의 영향이 큰 것으로 사료되었고, 특히 강풍 2일 경과 후

독도 주변해역에서는 전 수층에 걸쳐 엽록소 형광값이 관찰된 것은 섬효과에 의한 수층혼합의 영향을 강하게 받는 것을 시사할 수 있었다. 이는 위성엽록소영상에서도 명확하게 관찰되었듯이, 저기압 통과 10일 경과후인 5월 12일까지 울릉도-독도 주변해역에서 높은 엽록소가 지속적으로 유지된 것을 알 수 있었다. Baek *et al.* (2018) 보고에서는 위성자료가 제공되지 않아 시/공간적으로 식물플랑크톤 기인의 엽록소 거동을 명확하게 제시할 수 없었고, 그 결과, 저기압 통과 후 2~3일의 시간차(time lag)로 독도인근해역에서 식물플랑크톤이 빠르게 증식하여 대발생 시간차가 크지 않은 것에 관해서 언급하였다. 하지만, 본 연구에서 위성영상을 추가하여 해석한 결과, 5월 12일 최고치의 엽록소가 울릉도-독도 전 해역에 관찰되었으며, 이는 이벤트성 강풍(5월 2일)과 춘계 식물플랑크톤의 대발생 사이에는 적어도 10일 시간차가 있다는 사실을 새롭게 알 수 있었다. 이러한 결과는 Kim *et al.* (2007)이 언급한 장기 통계분석자료와 유사하였으며, 이는 해상 날씨와 해류의 흐름에 따라서 약간의 차이는 발생할 수 있지만, 춘계 식물플랑크톤의 대발생은 강풍이후 동해의 연안 용승과 함께 1~2주의 time lag을 두고 동해 중앙해역에 지대한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

한반도 동남부해역의 연안 용승에 의하여 반응한 식물플랑크톤이 공간이동하여 울릉도-독도 외측해역으로 확산되는 경향은 앞서 언급한 위성엽록소 이미지로 유추가능하다. 하지만 한반도 동남쪽 연안 기인 식물플랑크톤이 200~300 km 떨어진 외해역에서도 같은 종이 출현하는지를 구체적으로 파악하기 위해서는 식물플랑크톤의 군집조성을 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Baek *et al.* (2018)에서 언급한 식물플랑크톤 군집구성, 엽록소 위성이미지 영상, 풍향 풍속의 종합적인 자료를 Fig. 7에 나타내었다. 울진과 울릉도 사이 정점 DY2, DY4, DY6에서는 규조류가 80% 이상으로 극우점하였다. 반면, 울릉도 주변해역 정점 46과 울릉도와 독도의 중간 정점 50에서는 침편모조류 *Heterosigma akashiwo*가 60% 이상으로 높게 관찰되었고, 상대적으로 규조류 비율은 낮게 유지되었다. 특히 독도 주변 정점 20에서는 *H. akashiwo*가 80%로 높은 비율을 차지하였고, 반대로 정점 30에서는 규조류가 90%로 나타났다. Talley *et al.* (2004)와 Min and Warner (2005)은 동해 중앙해역에서 중소규모의 소용돌이성 해류를 보고하였고, Chang *et al.* (2002)과 Mitchell *et al.* (2005)는 울릉도-독도의 물리수괴구조를 명확하게 밝혀 울릉난수성소용돌이(Ulleung Warm Eddy)를 시사하였다. 특히 독도 인근(정점 27~30)에서 동해연안기원의 규조류가 우점한 것은 울릉난수성소용돌이의 영향에 의하여 일부분 동해 연안기원 규조류가 확장된 것을 시사할 수 있고, 울릉도와 독도 주변에서 침편모조류가 광범위하게 대발생한 것은 섬

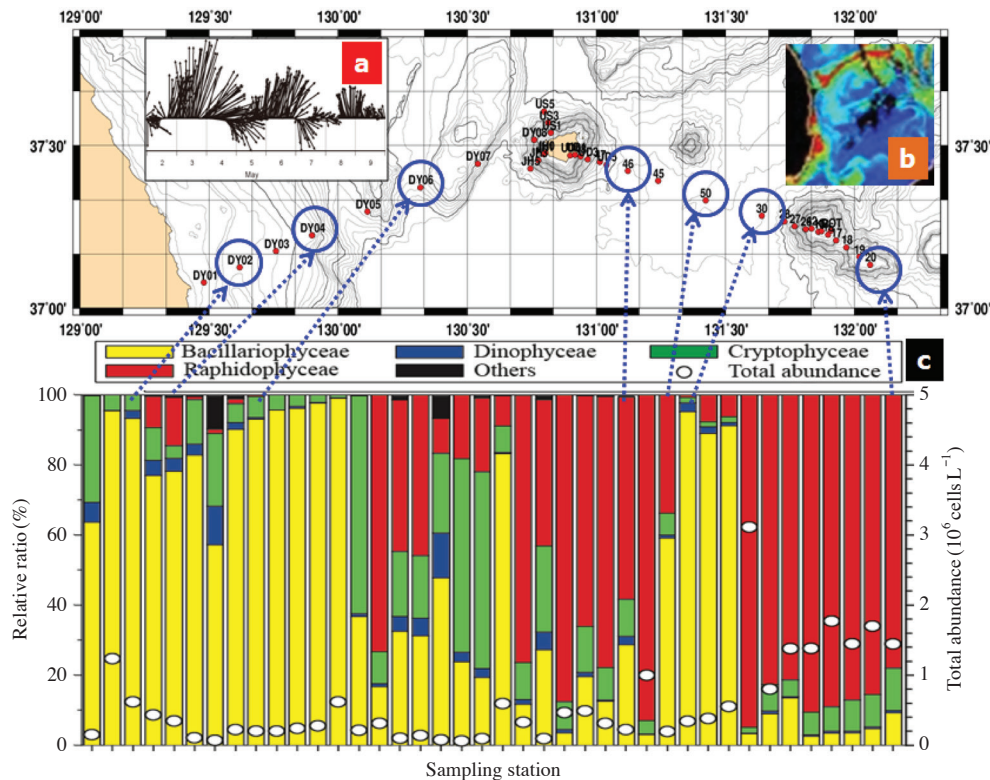


Fig. 7. Time series of wind direction from 2 to 9 May (a), Chl. *a* image data obtained from GOCI on 12 May (b), and relative dominant phytoplankton composition of the class level and total phytoplankton abundance (c) at the target sampling stations (DY2, DY4, DY6, 46, 50, 30 and 20) in the Uljin-Uleungdo-Dokdo line, which is redrawn based on Baek *et al.* (2018).

효과와 함께 저기압 통과 전 동안 난류에 의한 영향으로 유입된 *H. akashiwo* 유영세포가 일시적으로 섬효과에 의한 용승으로 공급된 영양염류를 효율적으로 이용하여, 3~4일 동안 기하급수적으로 증식한 결과, 독도 주변해역에서 극히 높은 개체수 밀도 ($>1.5 \times 10^6$ cells mL⁻¹)를 유지하였을 가능성이 높다. 결과적으로 위성 엽록소에서 파악된 광역해역의 시공간적인 자료는 동해 남서해역의 울릉도 독도 주변의 일차생산을 파악하는 데 중요한 정보를 제공할 수 있었다. 특히, 동한난류 주축의 흐름이 시시각각으로 변화하는 물리적인 특성에 따라서 편승하는 식물플랑크톤의 군집조성 및 생물량에도 일정하게 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

적 요

본 연구에서는 강풍에 의한 연안 용승 및 섬효과를 구체적으로 파악하기 위해서 춘계 강한 저기압 통과 전후를 대상으로 위성자료, 해양환경 및 물리적인 수직 구조와 함께 식물플랑크톤의 군집구조를 파악하였다. 5월 3일 강한 저기압이 통과하면서 남풍계열의 바람이 우점하였고, 10일 정

도의 시간차를 둔 5월 12일에는 동한난류가 이동한 경로 주변해역에서 높은 엽록소값이 관찰되었다. 식물플랑크톤 수평적 군집조성은 동한난류의 영향을 강하게 받은 울진 연안과 울릉도 사이의 정점에서는 규조류가 극히 높은 밀도로 우점하였고, 상대적으로 외양인 울릉도와 독도 섬 주변에서는 섬효과에 의하여 침편조류 *H. akashiwo*가 높은 개체수를 유지하였다. 엽록소의 수직적 분포는 울진에서 울릉도로 이어지는 정점에서 엽록소 아표층극대(Sub-surface Chl-*a* Maximum)가 20 m 층에서 관찰되었고, 울릉도와 독도 섬 주변의 대부분 정점에서는 30~40 m 층까지 전 수층에 걸쳐 균일하게 높은 엽록소 형광값이 관찰되었다. 이는 섬효과에 의하여, 강한 수층혼합이 일어난 것을 의미하고, 그 결과 유광층 상부에 공급된 영양염류에 의하여 식물플랑크톤이 대발생하였다. 결과적으로 춘계 한반도 남동해역(울진-울릉도-독도)에서는 남풍계열의 바람이 우점하면, 연안 용승이 발생할 수 있고, 이는 식물플랑크톤의 대발생에 중요한 역할을 하는 것으로 관찰되었다. 아울러, 동해 연안해역에서 기인된 식물플랑크톤은 동해 중앙 및 남서해역으로 공간이동하면서 울릉도-독도의 섬효과와 함께 동한난류의 사행, 소용돌이의 발달 등에 따라서 종조성이 다르게 나타날 가능성을 시사하였다.

사 사

본 연구사업은 한국해양과학기술원 주요사업(PE99606, PE99629)과 해양수산부의 연구과제 “독도의 지속가능한 이용연구(PG50400)”로 수행되었습니다. 장목2호 김기복 선장과 승무원께 감사의 마음을 전합니다.

REFERENCES

- Baek SH, D Kim, M Son, SM Yun and YO Kim. 2015. Seasonal distribution of phytoplankton assemblages and nutrient-enriched bioassays as indicators of nutrient limitation of phytoplankton growth in Gwangyang Bay, Korea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 163:256–278.
- Baek SH, M Lee and YB Kim. 2016. Growth and community response of phytoplankton by N, P and Fe nutrient addition in around water of Ulleungdo and Dokdo in East Sea. *J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc.* 17:186–195.
- Baek SH, M Lee and YB Kim. 2018. Spring phytoplankton community response to an episodic windstorm event in oligotrophic waters offshore from the Ulleungdo and Dokdo islands, Korea. *J. Sea Res.* 132:1–14.
- Chang KI, YB Kim, MS Suk and SK Byun. 2002. Hydrography around Dokdo. *Ocean Polar Res.* 24:369–389.
- Gong Y and S Son. 1982. A study of oceanic thermal fronts in the southwestern Japan Sea. *Bull. Fish. Res. Dev. Agency* 28:25–54.
- Hyun JH, D Kim, CW Shin, JH Noh, EJ Yang, JS Mok, SH Kim, HC Kim and S Yoo. 2009. Enhanced phytoplankton and bacterioplankton production coupled to coastal upwelling and an anticyclonic eddy in the Ulleung basin, East Sea. *Aquat. Microb. Ecol.* 54:45–54.
- Ichiye T. 1984. Some problems of circulation and hydrography of the Japan Sea and the Tsushima Current. pp. 15–54. In *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas* (Ichiye, T. ed.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Kim AR, SH Youn, MH Chung, SC Yoon and CH Moon. 2014. The influences of coastal upwelling on hytoplankton community in the Southern part of East Sea, Korea. *The Sea* 19:287–301.
- Kim D, EJ Yang, KH Kim, CW Shin, J Park, S Yoo and JH Hyun. 2012. Impact of an anticyclonic eddy on the summer nutrient and chlorophyll-*a* distributions in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *ICES J. Mar. Sci.* 69:23–29.
- Kim HC, S Yoo and IS Oh. 2007. Relationship between phytoplankton bloom and wind stress in the sub-polar frontal area of the Japan/East Sea. *J. Mar. Syst.* 67:205–216.
- Lee J and M Jang. 2014. Size dependent analysis of phytoplankton community structure during low water temperature periods in the coastal waters of East Sea, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 32:168–175.
- Lee M, D Kim, YO Kim, M Sohn, CH Moon and SH Baek. 2016. Seasonal phytoplankton growth and distribution pattern by environmental factor changes in inner and outer bay of Ulsan, Korea. *The Sea* 21:124–135.
- Lee T and T Rho. 2013. Contribution of nutrient flux through the Korea Strait to a primary production in the warm region of the East Sea. *The Sea* 18:65–69.
- Lim YK and SH Baek. 2017. Seasonal variation of primary producer phytoplankton community in the vicinity of oyster farming area between Tongyeong-Saryang Island. *Korean J. Environ. Biol.* 35:492–500.
- Liu G and F Chai. 2009. Seasonal and interannual variation of physical and biological processes during 1994–2001 in the Sea of Japan/East Sea: A three-dimensional physical-bio-geochemical modeling study. *J. Mar. Sci.* 78:265–277.
- Min DH and MJ Warner. 2005. Basin-wide circulation and ventilation study in the East Sea (Sea of Japan) using chlorofluorocarbon tracers. *Deep Sea Res. II* 52:1580–1616.
- Mitchell DA, DR Watts, M Wimbush, WJ Teague, KL Tracey, JW Book, KI Changm, MS Suk and JH Yoon. 2005. Upper circulation patterns in the Ulleung Basin. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud.* 52:1617–1638.
- Mooers CN, I Bang and FJ Sandoval. 2005. Comparisons between observation and numerical simulations of Japan (East) Sea flow and mass fields in 1999 through 2001. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud.* 52:1639–1661.
- Sournia A. 1978. *Phytoplankton manual*. UNESCO Press, Paris, France. *Monogr. Oceanogr. Method.* 6:1–337.
- Talley LD, P Tishchenko, V Luchin, A Nedashkovskiv, S Sagalaev, DJ Kang, M Warner and DH Min. 2004. Atlas of Japan (East) Sea hydrographic properties in summer, 1999. *Prog. Oceanogr.* 61:277–348.
- Yoo S and H Kim. 2004. Suppression and enhancement of the spring bloom in the southwestern East Sea/Japan Sea. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud.* 51:1093–1111.
- Yoo S and J Park. 2009. Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan? *J. Mar. Syst.* 78:301–315.

Received: 30 April 2018

Revised: 18 May 2018

Revision accepted: 21 May 2018