

## 반폐쇄적 내만 광양만에서 종속영양적조생물 야광충의 수문학적 및 생태학적 특성

백승호\* · 김동선<sup>1</sup> · 최현우<sup>2</sup> · 김영옥

한국해양과학기술원 남해연구소, <sup>1</sup>해양순환 기후연구부, <sup>2</sup>해양과학데이터센터

## Hydrographical and Bio-ecological Characteristics of Heterotrophic Red Tide Dinoflagellate *Noctiluca scintillans* in Semi-enclosed Gwangyang Bay, Korea

Seung Ho Baek\*, Dongseon Kim<sup>1</sup>, Hyun-Woo Choi<sup>2</sup> and Young Ok Kim

South Sea Institute, KIOST, Geoje 656-830, Korea

<sup>1</sup>Ocean Data and Information Unit, KIOST, Ansan 425-600, Korea

<sup>2</sup>Ocean Circulation & Climate Research Department, KIOST, Ansan 425-600, Korea

**Abstract** - In order to understand the population dynamics of red tide dinoflagellate *Noctiluca scintillans*, we examined its hydrographical and bio-ecological characteristics at 19 to 20 stations of Gwangyang Bay during all four seasons from 2010 to 2012. During the 3-year period, *N. scintillans* was seasonally abundant during summer with water temperatures ranging from 15°C to 22°C and salinity ranging from 25 psu to 30 psu. On the other hand, *N. scintillans* population density significantly decreased in spring, fall and winter, although they were present even in lower temperatures (<4°C). However, high water temperature (>27°C) and low salinity (<12 psu) led to the disappearance of *N. scintillans* population. Chl-*a* concentration in winter, spring and fall was positively correlated with *N. scintillans* population density, whereas the *N. scintillans* population was negatively correlated with Chl-*a* concentration in summer. This implies that densities of prey population such as diatoms are one of important contributing factor for maintaining abundance of *N. scintillans* in winter, spring and fall and for increasing abundance of *N. scintillans* in summer. During summer season, bio-accumulation of *N. scintillans* population by the wind from southwest is also considered to be a key factor in triggering the formation of large-scale blooms in Gwangyang Bay.

**Key words** : temperature, salinity, wind speed and direction, chlorophyll *a*, *N. scintillans*, Gwangyang Bay

### 서 론

적조현상은 미소생물이 호조건의 환경하에서 일시에

다량으로 증식하여 해수의 색깔을 변색시키는 현상이다. 우리나라 연안의 유해 유독 적조현상은 1980년대 이후 편모조류를 중심으로 빈번하게 발생하여 수산피해는 물론 인명피해까지 발생하는 큰 사회적 문제로 대두되고 있다. 잠재적 위해종 중의 하나인 야광충(*Noctiluca scintillans*)의 적조는 관광 및 해양 레저 활동의 저해를 가져

\* Corresponding author: Seung Ho Baek, Tel. 055-639-8513,  
Fax. 055-639-8509, E-mail. baeksh@kiost.ac

오고, 그들의 사멸과정에서 용존산소를 고갈시켜 연안해역에서 빈산소수괴를 형성하는 것으로 알려져 있다 (Zingone and Enevoldsen 2000). 그들 생물자체는 독성물질을 생성하지 않지만, 암모니아 농도를 증가시켜 어류 폐사에 영향을 미칠 뿐만 아니라 그들의 밀집된 개체수가 해양무척추동물에게 부정적 영향을 주는 것으로 보고되고 있다 (Umani *et al.* 2004). 특히 야광충은 잡식성 종속영양외편모조류로서 식물플랑크톤과 요각류의 알을 포식하고 먹이경쟁을 통해 동식물플랑크톤 군집에 부정적인 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다 (Enomoto 1956; Sekiguchi and Kato 1976; Nakamura 1998). 한편 야광충은 다른 적조생물을 포식하여 제거함으로써 자연 상태에서 유해유독성 플랑크톤의 독성 요소를 감소시키는 중요한 역할과 더불어 수주내 N과 P기원의 영양염류를 방출하여 다른 식물플랑크톤의 성장에 도움을 준다 (Tada *et al.* 2000).

야광충 적조의 형성은 풍선 같이 생긴 그들 생물의 형태학적 특성에 의한 영향으로 대부분 표층에서 분포하며, 유영능력이 극히 떨어져 바람 및 해류 등으로 인하여 수동적으로 집적과 확산을 반복한다 (Le Fevre and Grall 1970; Schaumann *et al.* 1988; Huang and Qi 1997; Delacruz *et al.* 2002). Huang and Qi (1997)와 Miyaguchi *et al.* (2006)의 온난해역 장기모니터링 보고에 의하면, 야광충 개체군 동태는 수온, 염분, 식물플랑크톤의 현존량, 일조량, 일조시간 등 복잡한 환경요인이 영향을 미치고 있지만, 이른 봄(2~3월)에서 대발생하여 초여름철(6~7월)까지 그들의 높은 개체수가 관찰되고 있는 계절적 특징을 보이고 있다. Elbrächter and Qi (1998)은 야광충의 개체수는 생물학적인 요인과 더불어 해양의 지리지형학적인 특성에 의하여 조절된다고 보고하였다. 특히 Miyaguchi *et al.* (2006)에 의하면, 일본 Sagami 만에서 야광충의 대발생은 개방된 만 외측에서 산발적으로 증식한 개체수가 바람에 의하여 연안해역으로 집적되어 야광충의 개체수가 일정수준에 도달되었을 때의 환경조건이 그들 성장에 최적이면 폭발적으로 증식하여 거대한 적조를 형성한다고 보고하였다.

국내에서 수행된 연구로는 일부 국한된 해역에서 시간적 변동과 생태학적인 특성에 관한 것이 유일하고 (Yoo *et al.* 2006; Jang *et al.* 2010; Baek *et al.* 2011), 잠재적 외래 위협종의 관점에서 국제항만을 중심으로 야광충의 분포특성과 수용능력에 대하여 조사한 사례가 Kang (2010)에 의하여 보고되었다. 결과적으로 우리나라에서 매년 대발생하는 야광충에 관한 연구는 일부 연구진에 의해 극히 제한된 해역에서 수행되었을 뿐이고, 바람과 강우

등과 같은 기상학적 데이터를 바탕으로 생물 집적의 관점에서는 논의된 사례가 없다.

본 연구는 Baek *et al.* (2011)의 후속 연구로서 반폐쇄적인 광양만에서 조류의 흐름, 먹이생물, 해양의 일반환경과 같은 수계지리학적 및 생물생태학적 관점과 더불어 풍향, 풍속, 강우 등과 같은 기상학적 관점에서 야광충의 개체수 변동과 집적에 관한 계절적 변동 특색을 논의하고자 하였다.

## 재료 및 방법

본 연구가 수행된 광양만은 남해연안에 위치한 반폐쇄성 내만으로 남쪽으로는 쿠로시오의 지류인 대마난류의 영향을 받아 외해수가 유입되고, 북쪽으로는 섬진강 담수의 영향을 강하게 받는다 (Lee *et al.* 2007). 광양만의 조석주기는 반일주조로 간만조가 매일 2회씩 일어나며, 일조부등은 작다. 만 주변의 광양시, 여수시, 순천시로부터 생활하수가 유입되고 있으며, 광양만 북부에는 광양제철소와 남부지역에는 여천국가산업단지로부터 공단 폐수가 유입되어 부영양화가 쉽게 발생할 수 있는 지형학적 특징을 가졌으나, 해수의 교환이 상대적으로 원활하여 만성적인 유해유독생물의 적조는 보고되고 있지 않는 실정이다.

광양만에서 야광충의 계절적 분포는 3년(2010~2012년)간 조사하였다 (Fig. 1). 조사는 2010년 20개 정점에서, 2011년과 2012년에는 최외곽 정점을 제외한 19개 정점에서 동계(2010년 2월 5~6일; 2011년 15~16일; 2012년 14~15일), 춘계(2010년 5월 4~5일; 2011년 5월 12~13일; 2012년 5월 1~2일), 하계(2010년 8월 24~25일; 2011년 8월 22~23일; 2012년 21~22일), 추계(2010년 23~24일; 2011년 11월 15~16일; 2012년 11월 20일)에 각각 수행하였다. 현장에서 YSI(6600 sonde) 및 CTD(316 plus)를 이용하여 수온, 염분, pH를 측정하였고, 투명도는 선상에서 Secchi disc를 이용하여 측정하였다.

표층수를 버킷으로 채수하여 입자성 부유물질(SS: suspended solids), Chlorophyll *a* (Chl.*a*), 용존산소(DO: dissolved oxygen), 영양염 농도, 식물플랑크톤의 개체수, 야광충 *N. scintillans*의 개체수를 각각 산출하였다. 부유물질(SS)은 GF/F필터로 표층해수(200~300 mL)를 여과한 후 건조량의 무게로 산출하였다. Chl.*a* 농도 측정을 위해서 표층수 300~1000 mL를 선상에서 GF/F필터(47 mm Whatman glass fiber filters)로 여과하였고, 그 필터는 15 mL 튜브에 넣어 냉동 보관하였다. 실험실에서 냉동 보

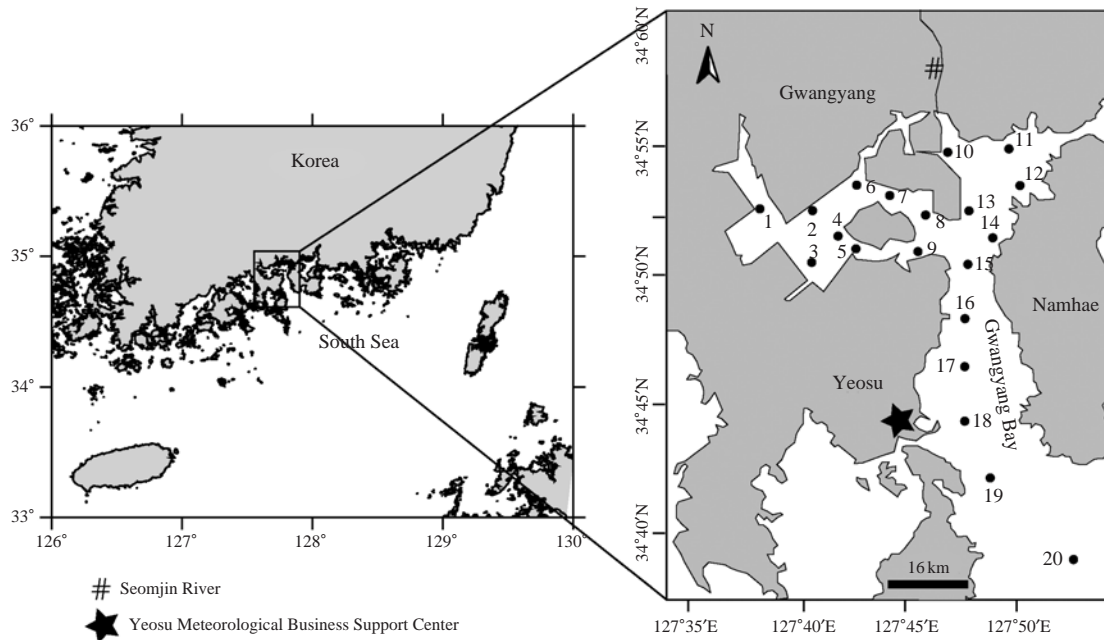


Fig. 1. Map of the study area indicating locations of sampling stations and meteorological support center in Gwangyang Bay.

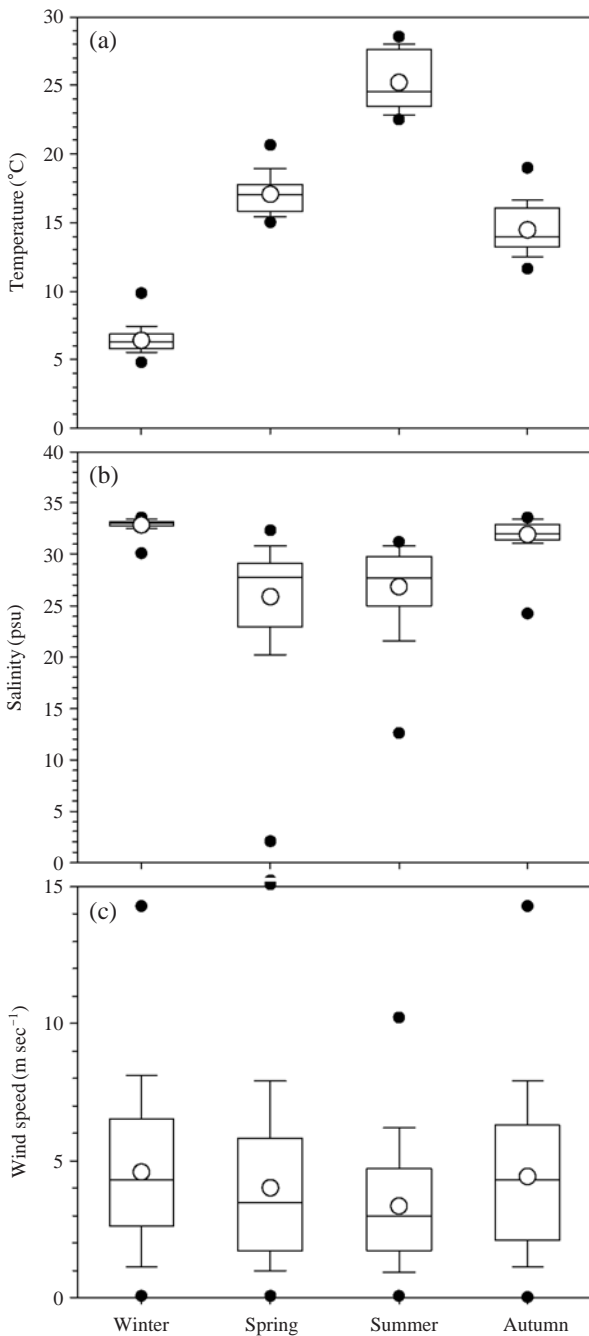
관한 여과지를 90% 아세톤에 넣고 24시간 냉암소에서 엽록소를 추출한 후 형광측정기 (Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 분석하였다 (Parsons *et al.* 1984). 용존산소는 표층수를 용존산소병에 채수하여 윙클러법으로 측정하였다. 영양염 분석용 시료는 GF/F필터를 통과한 여과 해수 20 mL를 30 mL PC병에 넣고 냉동 보관하였다. 실험실에서 냉동 보관한 시료를 분석 전 해동하여 규산염 ( $\text{SiO}_2$ ), 암모니아성 질소 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), 아질산과 질산성 질소 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ), 인산염 ( $\text{PO}_4\text{-P}$ )을 Parsons *et al.* (1984)의 분석법에 따라서 Auto Analyzer (Bran Luebble)로 분석하였다.

식물플랑크톤의 종조성과 현존량을 파악하기 위해서 500 mL의 샘플을 50 mL로 농축시킨 후 100~300  $\mu\text{L}$  분주하여  $\times 20$  또는  $\times 40$  배율로 동정 및 계수하여, 분류군별로 규조류, 와편모조류, 총 식물플랑크톤의 개체수를 산출하여 통계에 이용하였다. 표층부의 야광충 현존량은 500~1000 mL의 샘플을 루골 용액으로 고정한 후 200  $\mu\text{m}$  mesh로 10 mL로 농축시킨 후 해부현미경의 저배율로 모든 세포를 계수하였다.

아울러 광양만 주변의 풍속, 풍향 및 강우량의 자료는 기상청 여수서비스센터의 자료를 이용하였다. 야광충과 환경인자 간의 관계를 파악하기 위해서 주성분 분석 (PCA: Principal component analysis)을 통계 프로그램 XLSTAT 2010 (AddinSoft<sup>TM</sup>)으로 수행하였다.

## 결 과

광양만에서 3년 동안 수온변동은 하계 (평균:  $25.2 \pm 2.0^\circ\text{C}$ ; 최고:  $28.7^\circ\text{C}$ ; 최저:  $22.7^\circ\text{C}$ ), 춘계 (평균:  $17.0 \pm 1.3^\circ\text{C}$ ; 최고:  $20.7^\circ\text{C}$ ; 최저:  $14.5^\circ\text{C}$ ), 추계 (평균:  $14.4 \pm 1.6^\circ\text{C}$ ; 최고:  $19.0^\circ\text{C}$ ; 최저:  $11.8^\circ\text{C}$ ) 동계 (평균:  $6.3 \pm 0.8^\circ\text{C}$ ; 최고:  $10.0^\circ\text{C}$ ; 최저:  $4.7^\circ\text{C}$ ) 순으로 높게 나타났으며 온난해역의 전형적인 수온변화 경향을 보였다. 각 계절별 년도에 따른 정점간 수온 범위의 차이는 추계가  $7.2^\circ\text{C}$ 로 가장 큰 폭으로 변동했고, 나머지 계절에는  $3\sim 5^\circ\text{C}$  범위내로 변동하는 특성을 보였다. 동계에는 수심이 낮은 내측 정점에서 수온이 극히 낮았고 상대적으로 수심이 깊고 쿠로시오의 영향을 받는 만외측으로 갈수록 수온이 점차적으로 증가하였다 (Fig. 2a). 광양만의 염분변동은 섬진강의 영향을 강하게 받아 계절별, 정점별로 극히 심하게 변동하였고, 그 현상은 하계와 춘계에 두드러지게 나타났다. 3년 동안 평균 염분이 가장 낮게 관찰된 계절은 춘계  $25.8 \pm 4.0$  psu로, 다음으로 하계  $26.8 \pm 4.2$  psu로, 추계  $31.9 \pm 1.4$ , 동계  $32.8 \pm 0.7$  psu 순으로 관찰되었다. 특히 섬진강하구 정점 10에서 2011년 춘계에 1.94 psu로 가장 낮게 관찰되었고, 최고치는 동계 외측의 정점 20에서 33.9 psu를 기록하였다 (Fig. 2b). 풍향 및 풍속은 기상청 여수서비스센터에서 운영되는 자료를 취합하여 현장조사 당



**Fig. 2.** Box plot of temperature, salinity and wind speed during four seasons in the surface waters of Gwangyang Bay. Minimum and maximum are depicted by black dots, the box signifies the upper and lower quartiles, and the median and average is represented by short black lines and white dots, respectively.

일 기준으로 10일전의 자료를 이용하였다. 풍속의 평균은 동계, 추계, 춘계, 하계 순으로 높게 나타났고, 최고치는 2012년 춘계  $15.2 \text{ m s}^{-1}$ 로 관찰되었다(Fig. 2c). 강우는 현장조사 전 1개월간 모니터링 한 자료를 이용하였다.

강우는 하계와 춘계에 많은 양을 기록하였고, 춘계와 동계에 극히 낮게 관찰되었다(Fig. 3). 특히 2011년 춘계에는 조사 1일전 100 mm 높은 강우를 보여, 광양만 내측 해역에서 낮은 염분과 더불어 투명도 또한 대부분의 정점에서 1 m 이하로 극히 낮게 관찰되었다. 투명도는 2010년 춘계를 제외하면 만 내측 정점에서 모든 계절 1~3 m 전후로 극히 낮았고, 만 외측으로 갈수록 조금씩 증가하였다. 이러한 현상은 3년 동안 거의 모든 계절 유사한 경향을 관찰하였다.

광양만의 3년 동안 Chl.a 농도의 시공간적 분포특성을 Fig. 4에 나타내었다. Chl.a 농도의 변동은 하계  $1.58 \sim 35.10 \mu\text{g L}^{-1}$  (평균:  $13.19 \pm 9.07 \mu\text{g L}^{-1}$ ), 동계  $0.79 \sim 10.05 \mu\text{g L}^{-1}$  (평균:  $3.76 \pm 2.05 \mu\text{g L}^{-1}$ ), 춘계  $0.31 \sim 8.46 \mu\text{g L}^{-1}$  (평균:  $3.10 \pm 1.93 \mu\text{g L}^{-1}$ ), 추계  $0.79 \sim 3.75 \mu\text{g L}^{-1}$  (평균:  $1.77 \pm 0.62 \mu\text{g L}^{-1}$ ) 순으로 높게 관찰되었다. 2010년에는 하계에 광양만 내측에서 극히 높은 농도( $>15 \mu\text{g L}^{-1}$ )가 관찰된 반면, 만 외측으로 갈수록 점차적으로 감소하는 경향을 관찰하였다. 나머지 동계, 춘계, 추계에는 대부분의 정점에서  $3.0 \sim 5.0 \mu\text{g L}^{-1}$  전후의 값을 기록하였다. 2011년에는 하계에 정점 1을 제외한 내측 대부분의 정점뿐만 아니라 외측정점에서도 극히 높은 값이 기록되었고, 나머지 계절은 2010년과 유사한 경향을 보였다. 2012년에는 동계, 춘계, 하계에 계절 간의 차이는 크지 않았고 유사한 Chl.a 농도분포 경향을 관찰하였고, 추계는 모든 정점에서 극히 낮은 값이 기록되었다.

3년 동안 조사한 광양만의 야광충 개체수 변동을 Fig. 5에 나타내었다. 광양만에서 야광충은 연도별로 2010년  $>2012 \text{년} > 2011 \text{년}$  순으로 높게 나타났고, 하계  $>$  춘계  $>$  동계  $>$  추계 순으로 높게 나타났다. 특히 조사기간 모든 계절에 야광충이 출현하고 있다는 것이 특징적이다. 최고치는 2010년 하계 정점 20에서  $1142 \text{ indiv. L}^{-1}$ 로 관찰되었다. 2010년에는 춘계와 추계에 내만을 중심으로 상대적으로 높게 나타났고, 하계는 만 외측으로 향하는 정점 15에서 20 사이에서 극히 높은 개체수를 보였다. 동계는 뚜렷한 경향은 관찰되지 않았으나, 대부분 정점에서  $10 \sim 30 \text{ indiv. L}^{-1}$ 로 상대적으로 낮게 유지되었다. 2011년에는 동계와 추계에는 2~16번 정점에서 일정한 밀도( $10 \sim 20 \text{ indiv. L}^{-1}$ ) 출현하였고, 춘계에는 외측정점 12, 17, 18, 19 정점만 출현하였다. 특히 하계에는 내측정점(정점 5)에서 외측 정점 17으로 갈수록 점차적으로 높게 나타났고, 그 이후 정점에서는 조금씩 감소하는 경향을 관찰하였다. 2012년에는 하계에 정점 6, 9와 더불어 정점 14~17에서  $>90 \text{ indiv. L}^{-1}$ 으로 상대적으로 높게 관찰되었고, 동계와 춘계는 일부 정점을 제외한 대부분의 정점에서

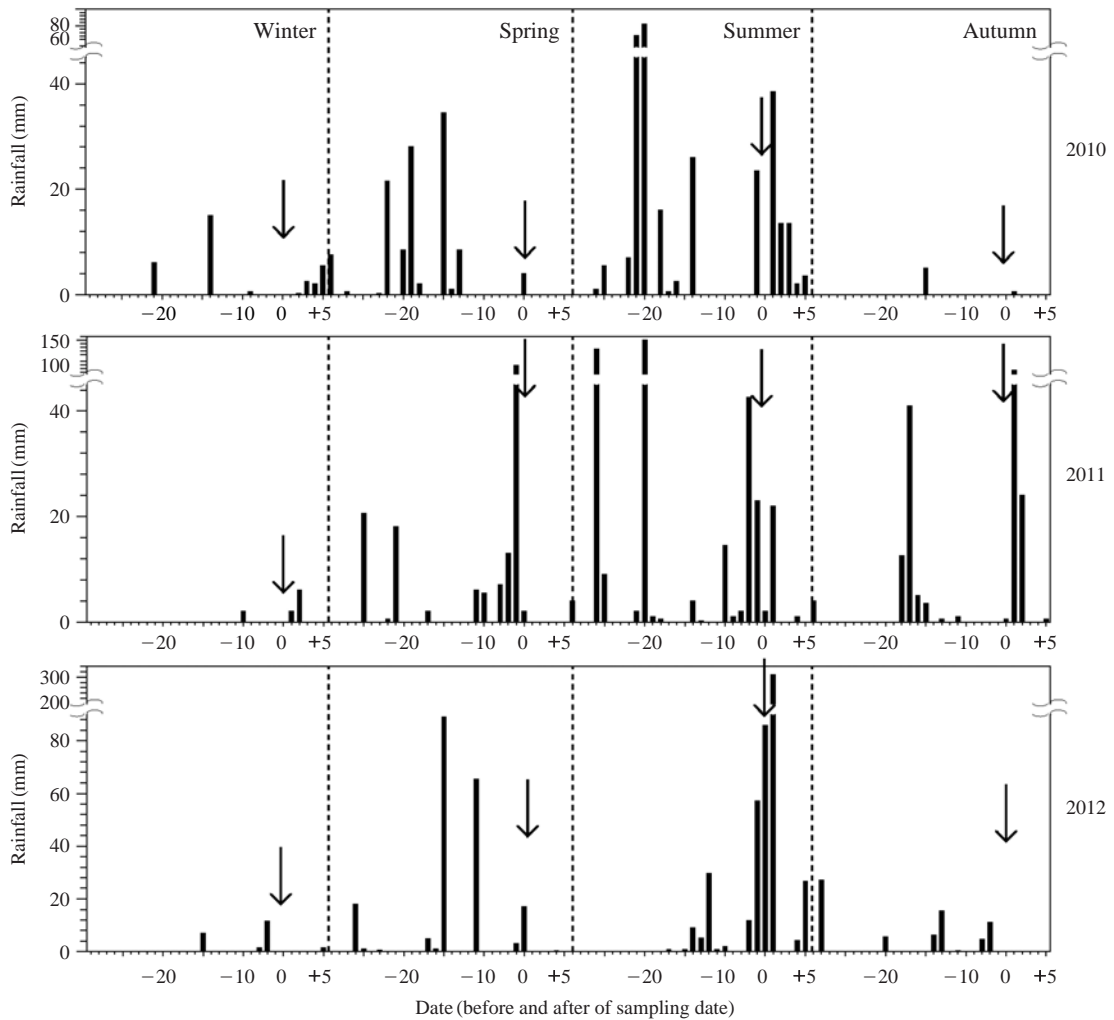


Fig. 3. Seasonal and temporal variations of rainfall from 2010 to 2012 in Gwangyang Bay. Arrows indicates sampling date.

일정수준의 개체수 ( $20 \sim 90 \text{ indiv. L}^{-1}$ )가 관찰되었다. 반면 추계에는 정점 간의 특이적인 경향은 관찰되지 않았고, 일정한 낮은 밀도를 유지하였다.

## 고 찰

야광충은 전 세계적으로 한대, 온대, 열대해역에 분포하여, 연안내만에서 빈번하게 적조를 유발한다 (Umani *et al.* 2004). 그들의 개체군은 풍선모양의 공기주머니와 같은 형태학적 특성 (집적과 확산이 용이함) 때문에 대부분 표층에서 바람, 조류, 해류 등의 요인에 의해서 수평적으로 확산과 소멸을 반복함으로 표층부를 제외한 다른 수층에서는 개체수가 급격히 감소한다. 따라서 동물플랑크

톤을 채집하는 네트로 저층에서 표층까지 수직인양하는 방법은 개체수가 존재하지 않는 수층의 여과 수율 (filtering rate)까지 환산되기 때문에 그들의 개체수를 정확하게 정량적으로 산출하지 못하는 단점이 있다. 이와 같은 점을 고려하여 본 연구에서는 표층부에 분포하는 야광충 개체수의 계절적 정점별 분포 양상을 파악하기 위해서 표층수를 버킷으로 채수한 후 망목 (mesh)으로 농축하여 개체수를 정량적으로 산출하여 평가하였다. 특히 야광충의 개체수를 조절하는 주요 환경인자로는 수온, 염분, 먹이농도가 가장 중요한 것으로 인식되어 왔다 (Enomoto 1956; Uhlig and Sahling 1990; Huang and Qi 1997; Tada *et al.* 2004). 다음으로 풍향, 풍속 및 조류의 영향을 들 수 있고, 이와 같은 요인은 생물의 집적과 확산을 유도할 수 있다 (Miyaguchi *et al.* 2006). 우리나라와 같은 전

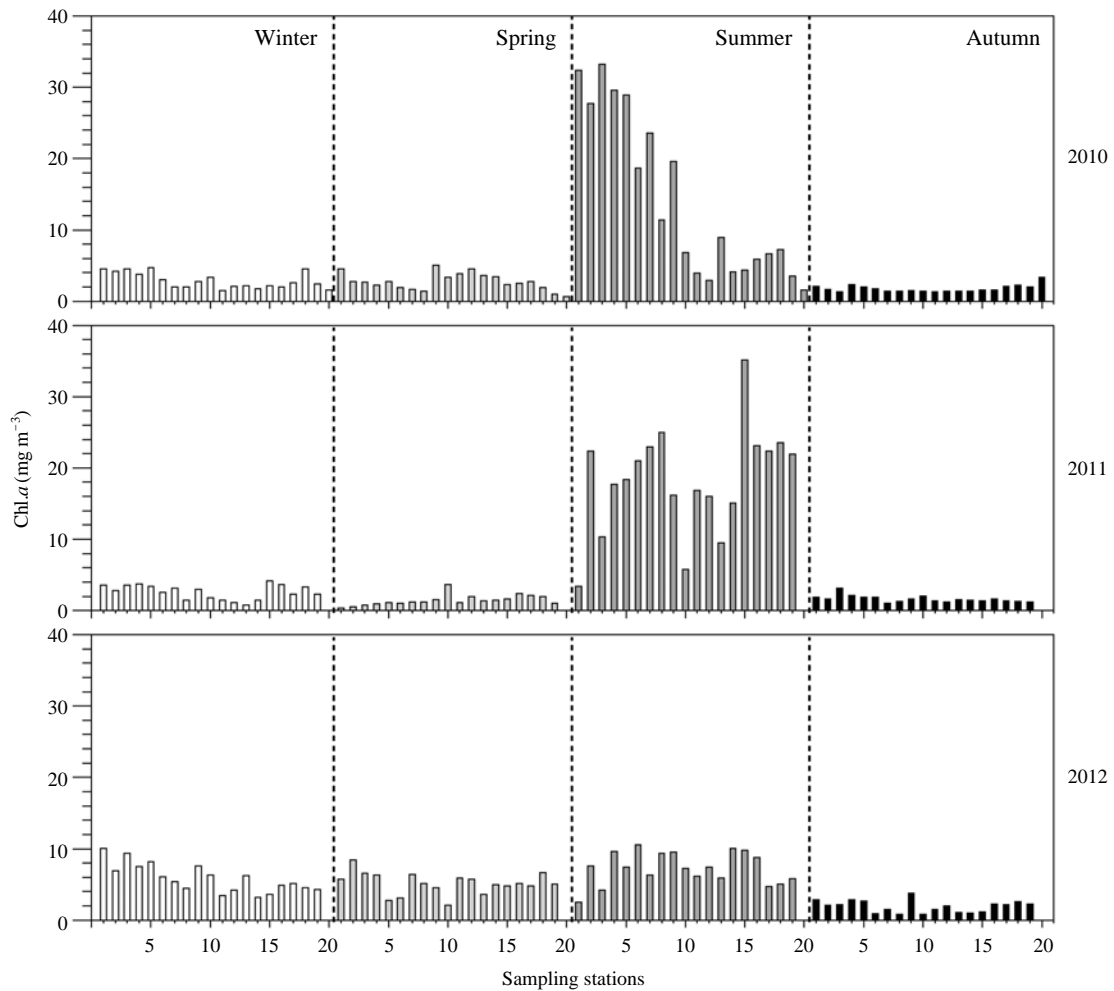


Fig. 4. Seasonal and temporal variations of Chl.a from 2010 to 2012 in Gwangyang Bay.

형적인 온난해역에서는 이들 조건이 충족되는 3월에서 5월 사이 연안의 내만 및 항구주변에서 극히 높은 밀도의 야광충 적조가 관찰된다.

한국 수로국에서 발행한 조류도에 의하면 (National Oceanographic Research Institute 2002), 광양만의 해수 흐름은 해저 지형학적으로 수심이 깊은 해역을 중심으로 해류의 세기가 강하며, 반일주조로 하루에 2번 창조와 낙조의 주기를 가지며, 전반적으로 낙조류가 창조류보다 강하게 흐르는 경향이 있다고 보고하였다. 특히 창조류는 광양만 서쪽을 중심으로 해서 북북동류하고, 낙조류는 남~동류가 주류를 이루고 있다. 이 해역의 창조류는 묘도의 남북수로를 통해 내만으로 흐르고, 북쪽으로는 대도군도 양측의 좁은 수로를 통과한 주류는 노랑대교로 흐르고, 한 지류는 마도수로를 지나 섬진강으로 흐른다 (Fig. 6a). 낙조류는 창조류의 조류 흐름과 정반대

방향으로 흐른다 (Fig. 6b). 광양만의 풍향 및 풍속은 동계에는 거의 대부분 북서풍이 우점하였고 (Fig. 7), 야광충의 개체수 분포는 정점별로 뚜렷한 분포특성을 보이지 않았다. 특히 일부 정점을 제외하면  $50 \text{ indiv. L}^{-1}$  이하로 관찰되어 풍속이나 풍향에 의한 집적현상에 의한 영향으로 보기 어렵다. 춘계에는 2010년과 2011년에는 남서풍과 북동풍으로 우점하였고, 2012년에는 동풍이 30% 이상을 차지하였다. 추계에는 2010년에는 북동풍과 북서풍이 우점하였고, 2011년에는 북동풍이, 2012년에는 북서풍이 각각 우점하는 특성을 보였다. 하계를 제외한 동계, 춘계, 추계는 야광충의 개체수는 극히 낮게 관찰되어 풍향과 풍속에 의한 영향으로 정점간의 개체수 밀도가 다르다고 판단하기 어려웠다. 하계에는 주로 남서풍이 탁월하였고, 풍속 또한 평균  $4 \text{ m s}^{-1}$  전후로 상대적으로 중규모로 관찰되었으며, 이와 같은 풍속 및 풍향은 야광충

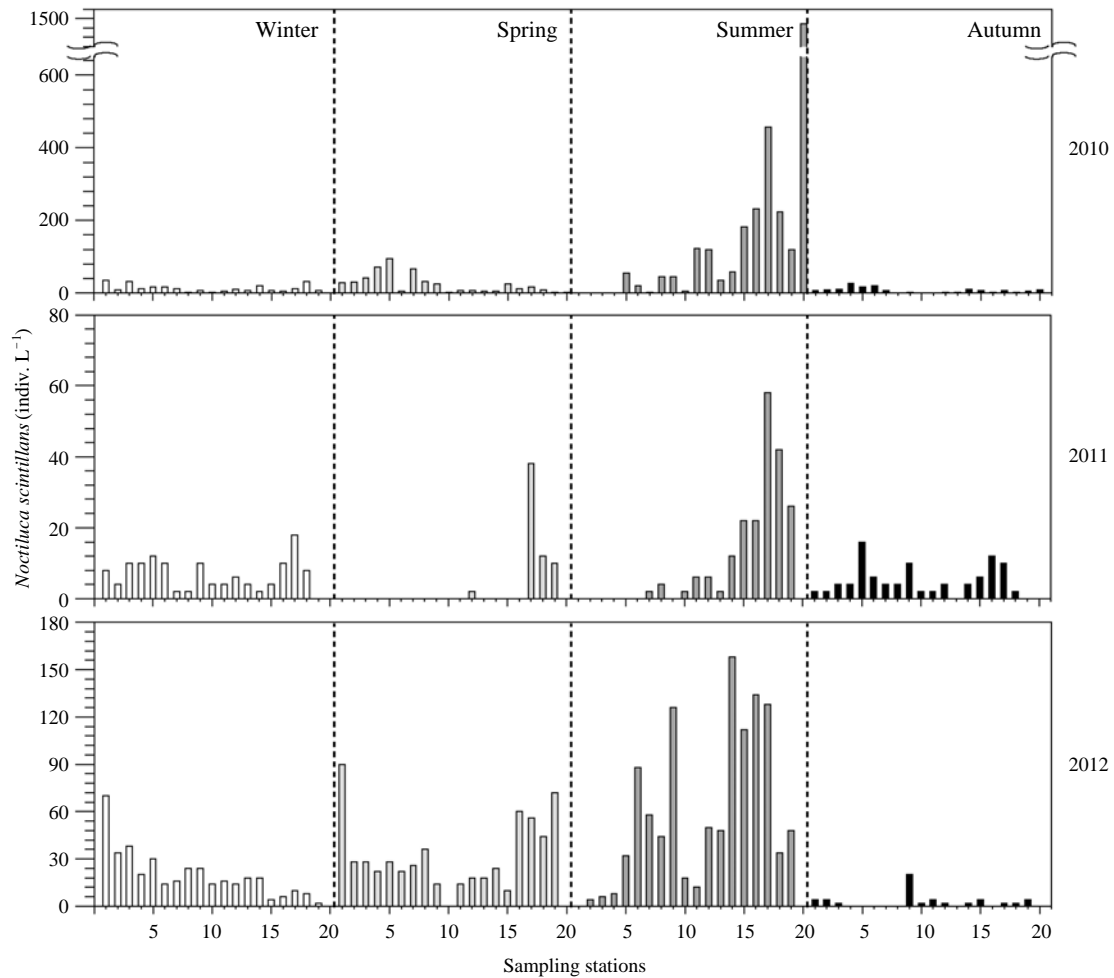


Fig. 5. Seasonal and temporal variations of dinoflagellate *Noctiluca scintillans* from 2010 to 2012 in surface water of Gwangyang Bay.

의 출현 개체수의 변동에 중요한 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 특히 2010년에 최고밀도를 보인 광양만 최외곽 정점 20에서는 전선(front)이 형성되어 있었으며, 전선 주변으로 야광충의 적조 띠를 관찰할 수 있었다. 이는 광양만 바깥쪽 남해안(거문도, 백도해역)에서부터 남서풍으로 인하여 야광충의 개체수가 남해도(Namhae peninsula)선단에 부딪혔고(Fig. 6 창조시 조류의 흐름참조) 그 주변 정점에 해당되는 정점 20에서 극히 높은 밀도가 집적되었을 가능성이 높다. 유사하게 2011년과 2012년 하계에도 남서풍이 탁월하였고, 야광충밀도 또한 바깥쪽 정점에서 상대적으로 높은 밀도가 관찰되었다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 조류의 흐름과 일정 속도로 부는 하계 남서풍의 영향으로 남해안 바깥쪽 해역에서 산발적으로 증식한 야광충 개체수가 광양만쪽으로 집적되었을 가능성이 크다. 본 연구와 유사하게 Sagami만에

서 Miyaguchi *et al.* (2006)의 장기모니터링 보고에서도 남동풍이 강하게 우점하는 년도에는 만 바깥쪽의 야광충이 만 안쪽 연안으로 집적되어 폭발적인 대발생을 일으킨다고 하였다. 이는 풍선같이 생긴 야광충의 형태학적 특성과 더불어 다른 외편모조류보다 크기가 10~20배가 더 커서 바람의 방향에 따라서 흐르는 표층수의 흐름에 민감하게 반응할 수 있는 생물학적 특성의 결과로 사료된다.

외편모조류의 개체수 조절은 주로 수온에 의한 영향이 크고, 야광충 또한 수온에 의한 계절적 개체군 증감을 유발하는 가장 중요한 인자로 파악된다. 본 조사기간 동안 광양만에서 수온범위는 4.7~28.7°로 관찰되었고, 모든 계절 야광충이 출현한 것으로 보아 우리나라와 같은 온난해역에서는 계절적 수온 변화 범위와 관계없이 호조건의 환경조건만 갖추어지면 언제든지 발생할 수 있

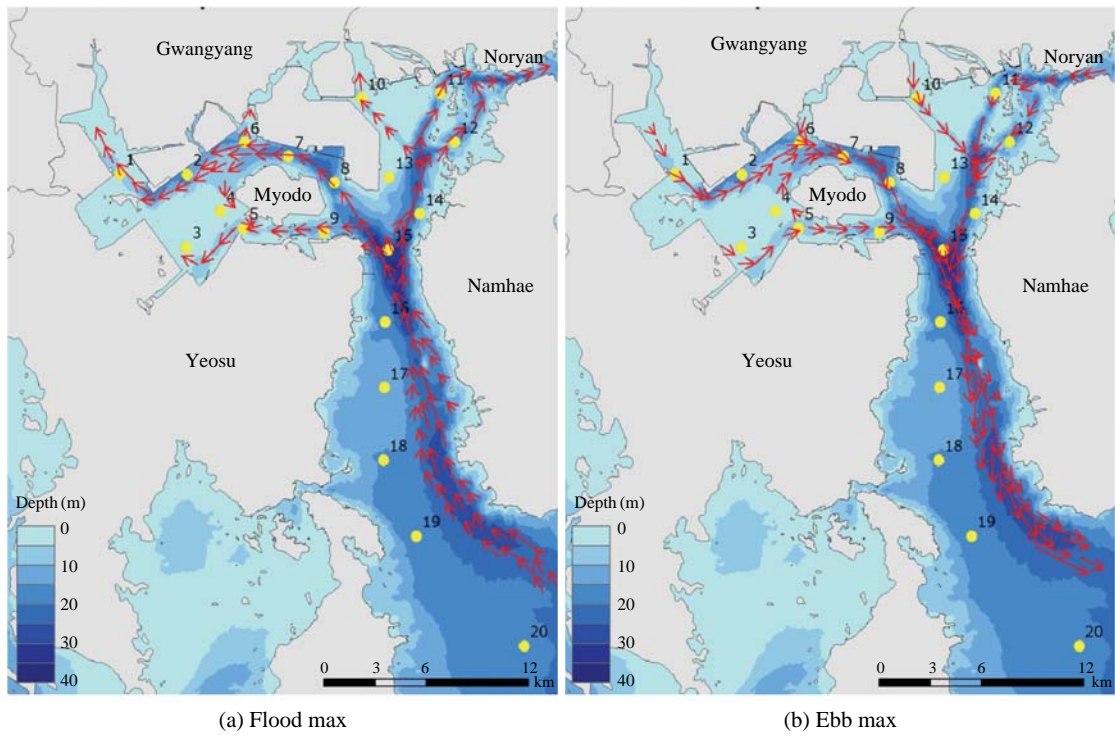


Fig. 6. Map of tidal current in (a) flood max and (b) ebb max in Gwangyang Bay.

다는 것을 의미한다. Yoo *et al.* (2006)와 Kang (2010)의 보고에 의하면, 우리나라 주요항만에서 야광충의 출현 수온 범위는 2.1~26.4°C로, 5°C 이하의 조건에서도 생존 가능하였다. 특히 Yoo *et al.* (2006)은 인천연안 주변에서 야광충의 출현 최고 수온은 25.6°C였으나, 수온이 25°C 이상에서는 그들의 개체수가 급격하게 감소하거나 출현하지 않는 것을 보고하였다. 앞서 언급한 Yoo *et al.* (2006)의 보고와 유사하게 남방기원의 쿠로시오난류의 영향을 강하게 받는 일본 Sagami 만에서는 계절적인 수온 변동은 10°C에서 30°C로 변화하였지만, 수온이 높은 하계에는 개체수 밀도가 극히 낮게 관찰되거나 소멸되는 특색을 보였다(Miyaguchi *et al.* 2006; Baek *et al.* 2008). 또한 일본 Seto내해에서도 저수온기에는 활발한 증식으로 개체수밀도가 높게 관찰되었으나, 하계의 고수온(27°C)에서는 그들의 개체가 관찰되지 않았다(Tada *et al.* 2004). Huang and Qi (1997)의 보고에 의하면 중국의 Dapeng Bay(아열대성 해역)에서는 15.8~28.6°C의 수온범위에서 야광충의 출현을 보고하였고, 25°C 이상이면 개체수가 급격히 감소하였다. 본 연구에서는 수온 25°C와 염분이 29.5psu에서 세포밀도가 가장 높게 관찰되었고, 수온 >25°C의 조건에서는 개체수가 관찰되는 정점은 그다지 많지 않았고 그 밀도 또한 극히 낮게 유지되었다. 일본

해역에서 분리 배양한 야광충을 대상으로 배양 실험한 결과에 의하면(Tada *et al.* 2004), *N. scintillans*의 성장은 수온이 낮은 10°C에서도 증식능력이 유지되고 있었으나, 27°C부터 성장율이 급격히 떨어졌고, >28°C에서는 성장을 하지 않거나 음(-)의 성장을 보였다. 결과적으로 한국, 중국, 일본의 온난해역과 아열대해역에서 야광충의 출현 수온범위를 종합적으로 정리해보면, 야광충은 3~28°C로 광범위한 수온에서 적응 가능하다고 판단되면, 최적 수온은 15~25°C로 판단된다. 특히 우리나라 연안해역에서 출현하는 야광충은 저온에 대한 높은 적응력을 보일 것으로 판단되며, 아열대해역에서 조차 보고되지 않은 28°C 부근의 수온에서도 개체군을 유지할 수 있는 잠재적 능력을 가진 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 추계 광양만에서 야광충의 개체수 밀도가 그다지 높게 관찰되지 않았으나, 다른 우리나라 주요 내만에서 출현하는 야광충의 적조현상은 주로 춘계(4월~7월)와 더불어 추계(10월~11월)에 발생하는 것 또한 계절적 수온과의 연관성(15~22°C)이 높다고 할 수 있다. 식물플랑크톤의 휴면포자(cyst)의 형성은 겨울의 저수온을 극복하고 이듬해 수주내 씨앗종(seed population)의 공급원으로서 생태학적 중요한 의미를 부여한다. 하지만 야광충은 현재까지 휴면포자의 형성이 보고되지 않았으며,



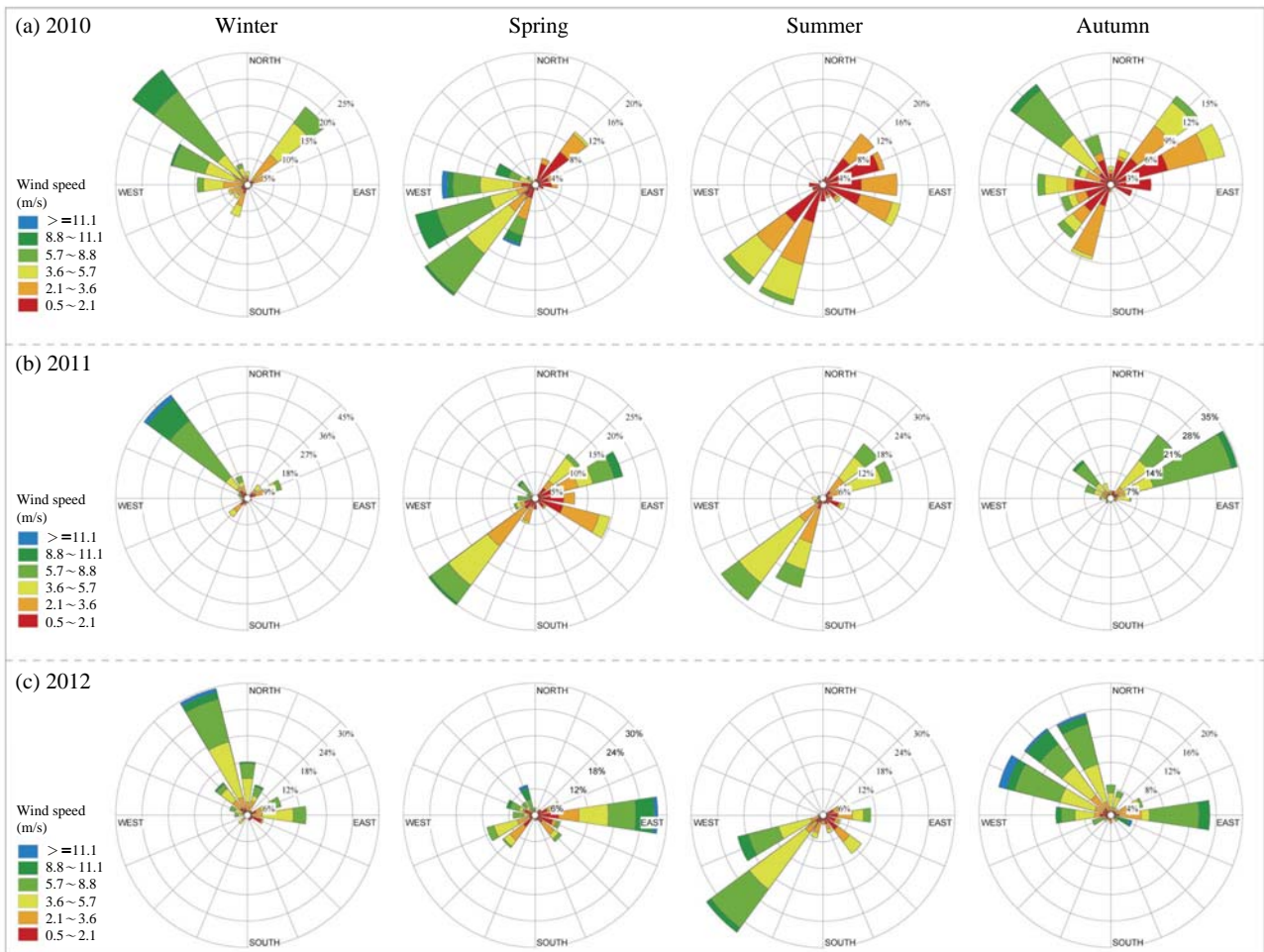


Fig. 7. Wind rose shows wind direction and wind speed. Data for the wind rose is gathered from observations before 10 days of sampling date in Gwangyang Bay.

우리나라에서는 연중 출현하여 항상 수주내 유영세포가 존재하고 있다는 것은 휴면포자를 필요로 하지 않을 가능성이 높다. 최적의 수온범위 또한 다른 종속영양화편모조류와 비교하여 상당히 넓은 범위를 보여 대발생 (huge blooming)할 잠재적 가능성이 높아 매년 같은 시기에 적조가 일어날 수 있고, 집적과 확산의 정도에 따라서 연안 내만의 적조의 규모가 결정될 것으로 생각된다.

염분은 온도와 더불어 야광충의 개체수를 조절하는 중요한 인자이며, 특히 무각의 종속영양화편모조류인 야광충의 소멸양상에 중요한 영향을 미친다 (Uhlig and Sahling 1990; Huang and Qi 1997; Dela-Cruz *et al.* 2002; Miyaguchi *et al.* 2006; Baek *et al.* 2009). 2011년 춘계에는 조사 1일 전 100 mm 이상의 높은 강우를 보여, 섬진강으로부터 대량의 담수가 유입되어 광양만 내측해역에서 낮은 염분과 더불어 투명도 (대부분의 정점에서 1 m 이하)가 극히

낮게 관찰되었는데, 이는 집중호우로 인하여 육상기원의 토석류가 연안 내만으로 유입된 결과로 판단되었다. 광양만은 모든 계절 투명도가 극히 낮게 관찰되었는데, 이는 만의 지리적인 특성상 수심이 얕아 수층 혼합이 활발하게 나타난 결과 입자성부유물질이 수주내 (water column)에 높게 나타나 투명도를 저하시켰다고 판단된다. 광양만에서 야광충의 개체수는 염분이 12.2~33.4 psu 범위에서 출현하였으며, 23.1~29.5 psu 사이에서 개체수밀도가 상대적으로 높게 나타났다. Huang and Qi (1997)의 보고에 의하면, Daepeng 만에서 야광충은 19.1~33.4 psu 범위에서 출현하였으며, 29.0 psu 이상에서 대증식이 일어났고, 27.0 psu 이하에서는 개체수가 급격히 감소하여 염분이 12.0 psu 이하로 떨어지면 개체군이 소멸하였다. Yoo *et al.* (2006)은 우리나라 인천연안에서 염분이 17.1 psu로 낮게 관찰되었을 때 야광충의 출현이 관찰되지 않았으

나, 본 연구에서도 Yoo *et al.* (2006)의 결과와 유사하게 2011년 춘계에는 저염분수괴 (2.0~23.8)가 광양만 안쪽 (정점 10~15)에 영향을 미쳤을 때 야광충의 개체수가 전혀 관찰되지 않았고, 일부 외측정점의 염분이 23.0 psu 이상에서만 10~40 indiv. L<sup>-1</sup>로 관찰되었다. 특히, 2010년 춘계 섬진강의 영향을 강하게 받는 정점 10 (염분 12.2 psu)에서 낮은 개체수 (2 indiv. L<sup>-1</sup>)가 관찰되었고, 이는 12.0 psu 전후에서도 야광충이 생존할 수 있다는 것을 간접적으로 시사하였다. Sagmi Bay의 서부해역에서 염분이 33.6~35.0 psu 조건에서 높은 밀도의 야광충의 개체수가 관찰되었고 (Miyaguchi *et al.* 2006), 동일해역의 연안 부두에서 춘계와 하계에 일일 모니터링한 결과에 의하면, 100 mm 이상의 강우가 관찰된 후 염분이 33.0 psu에서 23.7 psu로 급격히 하강하였을 때 야광충의 개체수밀도 또한 현저하게 감소하였다 (Baek *et al.* 2009). 해양에 서식하는 운동성을 가지는 무각와편모조류의 대부분은 최적환경의 염분 차이를 보이지만 저염분에 대한 내성은 10.0~14.0 psu로 보고되고 있고 (Kim *et al.* 2004; Nagasoe *et al.* 2006), 야광충 또한 무각을 형성하는 종으로 극히 낮은 염분 (<10.0 psu)에 적응이 어려울 것으로 판단된다 (Tada *et al.* 2004; Yoo *et al.* 2006). 염분변화는 강우량에 의하여 크게 의존되며, 가령 야광충의 대증식 기간에도 2011년 춘계와 같이 높은 강우량에 의해서 연안 내만에 염분이 현저하게 떨어지면 그들의 개체군이 소멸하거나, 급격히 감소할 수 있다는 것을 알 수 있었다. Yoo *et al.* (2006)의 보고에서도 야광충 개체수의 출현은 강우와는 유의한 상관성이 관찰되지 않았으나, 조사시기를 기점으로 3주간 이동평균의 결과에서 강우가 적은 시기에 출현개체수가 높았고, 강우가 많은 시기에 출현 개체수가 낮게 관찰되었다. 본 연구에서는 야광충의 출현 개체수와 염분은 춘계에 정(+)의 상관성이 나타났고, 이는 높은 염분농도가 유지되었을 때 야광충 개체수를 일정량 유지할 수 있다는 것을 의미한다. 염분에 관해서 요약하면, 야광충은 12.0 psu 전후에서 저염분에 대한 염분내성의 한계라고 판단되며, >30.0 psu 고염분 조건에서 최적의 성장조건이라고 할 수 있다. 아울러 상대적으로 저염분수괴 (20.0 psu 전후)에서도 일정한 개체수 밀도가 관찰되는 것으로 보아 생존 및 증식이 가능할 것으로 사료된다.

앞서 언급한 수온과 염분은 계절적 출현과 정점별 분포양상을 결정하는 주된 인자로 판단되지만, 식물플랑크톤의 개체수 즉 먹이농도는 야광충 개체군의 대발생 규모를 조절할 수 있는 가장 중요한 인자로 판단된다 (Schumann *et al.* 1988; Uhlig and Sahling 1990; Nakamura 1998;

**Table 1.** Correlation between environmental parameters and *Noctiluca scintillans* population densities in the surface layer at 19 or 20 stations in Gwangyang Bay

Gwangyang Bay	Winter	Spring	Summer	Autumn
Temperature	-0.42*	-0.40*	0.05	-0.14
Salinity	0.08	0.42*	0.11	0.15
Secchi depth	-0.37*	0.30*	0.66*	-0.27*
Suspended solid (SS)	0.07	-0.28*	-0.08	0.05
pH	0.47*	0.41*	0.35*	0.16
DO	0.54*	0.46*	-0.03	-0.20
PO <sub>4</sub>	-0.20	-0.50*	-0.12	0.53*
Si(OH) <sub>4</sub>	-0.10	-0.49*	-0.10	0.11
NO <sub>3</sub>	-0.16	-0.43*	-0.15	0.04
NH <sub>4</sub>	0.11	-0.31*	-0.10	-0.18
DIN	-0.08	-0.43*	-0.15	-0.03
DIN/DIP	0.04	0.01	-0.10	-0.24
Chl.a	0.74*	0.42*	-0.30*	0.27*
Total phytoplankton	0.15	0.36*	-0.29*	0.19
Diatom	0.12	0.46*	-0.28*	-0.13
Dinoflagellate	0.25	0.39*	-0.02	0.00

Values in bold are different with a significance level alpha=0.05

Miyaguchi *et al.* 2006). 야광충은 소형 동물플랑크톤, 동물플랑크톤의 알, 원생생물등을 먹이원으로 이용하지만, 주된 먹이원은 부유성 식물플랑크톤이다 (Enomoto 1956; Buskey 1995). 특히 어떤 미세조류를 먹이원으로 포식 및 공생하는가에 따라 적색 적조 (red tide) 및 녹조 (green tide)를 형성할 수 있다. 온난해역에서 서식하는 종은 주로 적색을 띠고 (Huang and Qi 1997; Miyaguchi *et al.* 2006), 동남아시아의 열대 및 아열대해역 (e.g. Thailand, India, Philippines, New Guinea)에서 서식하는 종은 Prasinophyta *Pedinomonas noctilucae*의 생물이 식포내 공생하기 때문에 녹색의 적조를 형성한다 (Sweeney 1976; Hansen *et al.* 2004; Sriwoon *et al.* 2008). 온난해역에서 출현하는 야광충은 규조류의 대증식 후 수계내 그들의 먹이원이 충분하게 존재하는 것이 폭발적인 증식에 크게 기여한다 (Miyaguchi *et al.* 2006; Baek *et al.* 2009). 일반적으로 야광충은 규조류의 농도가 높고, 크기가 10 μm 이상일 경우 성장률이 높아진다 (Nakamura 1998). Kuroda and Saga (1978)의 보고에 의하면, 일본의 Seto내해에서는 부영양화와 야광충의 적조발생빈도와 상관성이 있었고, 중국에서도 부영양화 현상은 미세조류의 대증식을 유발하여 야광충 적조발생의 주된 원인으로 파악되었다 (Uhlig and Sahling 1990; Qi *et al.* 1993; Hung and Qi 1997). 본 연구에서도 광양만 야광충은 Chl.a 농도의 뚜렷한 상관성을 사계절 모두 관찰할 수 있었다 (Table 1;  $p < 0.05$ ). 특히 동계와 춘계, 추계에는 Chl.a와 양(+)의 상관성이 관찰되었으나, 야광충 밀도가 높은 하계에는 음(-) 상관성이 각각 관찰되었다. 즉, 수계내 개체수 밀도가 충분하게 존

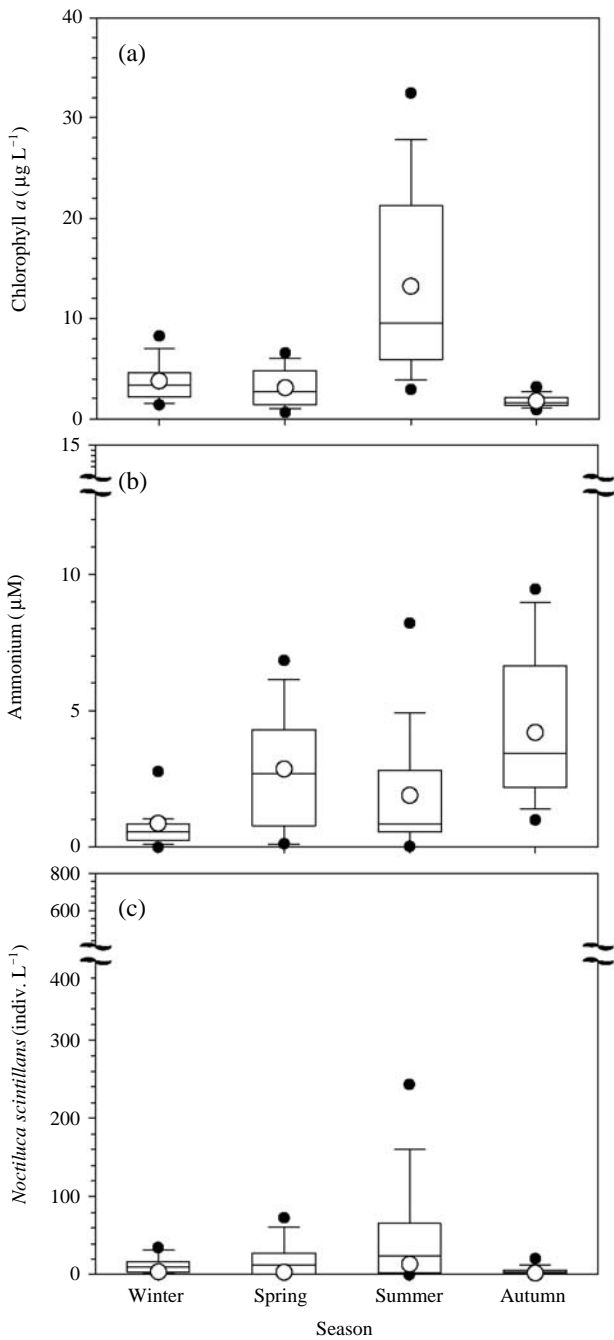
**Table 2.** Loading factors of seasonal environmental variables and phytoplankton biomasses on the first three Varimax rotated principal components for the surface water in Gwangyang Bay in 2010~12 (loadings >0.6 are bolded)

Variable	Components											
	Winter			Spring			Summer			Autumn		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Correlation coefficient												
Temperature	-0.48	0.31	-0.25	0.14	-0.37	<b>-0.70</b>	-0.38	<b>-0.67</b>	0.34	-0.17	<b>-0.83</b>	-0.33
Salinity	0.04	-0.53	<b>-0.69</b>	<b>-0.80</b>	0.17	0.50	<b>-0.89</b>	-0.22	0.08	<b>-0.88</b>	0.34	-0.16
Sacchi depth	-0.39	0.26	<b>-0.63</b>	<b>-0.78</b>	0.08	-0.44	-0.10	-0.11	<b>-0.85</b>	-0.23	0.01	0.10
Suspend solid (SS)	0.31	0.05	-0.54	<b>0.65</b>	-0.31	0.39	-0.49	-0.01	0.34	-0.24	-0.28	-0.50
pH	<b>0.77</b>	0.09	0.08	<b>-0.94</b>	0.06	-0.04	-0.24	0.00	<b>-0.64</b>	-0.10	<b>0.75</b>	-0.43
Dissolved oxygen (DO)	<b>0.84</b>	0.19	0.32	-0.57	<b>0.67</b>	-0.28	-0.58	0.47	-0.03	0.48	-0.08	<b>0.83</b>
Phosphate	-0.51	-0.20	0.42	<b>0.66</b>	<b>-0.60</b>	0.03	0.58	-0.53	0.34	0.11	0.39	-0.32
Silicate	-0.17	0.56	-0.10	<b>0.95</b>	-0.23	-0.07	<b>0.90</b>	-0.23	0.08	<b>0.85</b>	0.45	-0.10
Nitrate+nitrite	-0.14	<b>0.83</b>	0.46	<b>0.96</b>	-0.16	-0.03	<b>0.96</b>	0.01	0.07	<b>0.97</b>	0.17	0.06
Ammonium	0.25	<b>0.68</b>	-0.25	<b>0.68</b>	-0.35	0.53	<b>0.74</b>	-0.37	0.19	0.42	-0.20	<b>0.78</b>
DIN	-0.02	<b>0.93</b>	0.26	<b>0.96</b>	-0.18	0.02	<b>0.97</b>	-0.05	0.09	<b>0.92</b>	0.06	0.33
DIN/DIP	0.24	<b>0.88</b>	-0.12	0.49	<b>0.65</b>	0.36	0.03	<b>0.62</b>	-0.06	<b>0.86</b>	-0.09	0.37
Chl.a	<b>0.94</b>	0.00	0.05	-0.11	<b>0.93</b>	0.16	-0.15	<b>0.89</b>	0.11	-0.34	0.29	0.53
Total phytoplankton	0.38	0.27	<b>0.72</b>	-0.26	<b>0.88</b>	0.01	-0.05	<b>0.95</b>	0.11	-0.04	<b>0.66</b>	<b>0.63</b>
Bacillariophyta	0.34	0.27	<b>0.72</b>	-0.45	<b>0.80</b>	-0.03	-0.08	<b>0.95</b>	0.12	0.14	0.07	<b>0.94</b>
Dinophyta	0.24	-0.30	0.35	-0.06	<b>0.60</b>	0.47	-0.53	-0.28	0.45	-0.13	<b>-0.75</b>	0.13
<i>Noctiluca scintillans</i>	<b>0.75</b>	-0.15	0.03	-0.46	0.37	0.29	-0.14	-0.31	<b>-0.73</b>	-0.06	0.39	-0.17
Eigenvalue	4.79	3.69	2.43	8.88	3.36	1.45	5.82	4.04	2.30	5.94	3.13	2.68
% of variance	28.16	21.72	14.27	52.25	19.79	8.55	34.26	23.78	13.50	34.95	18.38	15.77
Cumulative % of variance	28.16	49.88	64.15	52.25	72.05	80.59	34.26	58.03	71.54	34.95	53.34	69.10

재하지 않은 시기인 동계, 춘계, 추계에는 식물플랑크톤의 생물량 즉 먹이생물의 농도가 중요하게 작용되지만, 일정한 개체수 밀도를 유지하는 하계와 같은 계절에는 야광충이 식물플랑크톤을 현저하게 포식하여(-)의 상관성이 관찰되었다. 특히 2010년과 2011년 하계에는 광양만 내만을 중심으로 규조류 *Skeletonema costatum*의 단일 종이 극우점하였고, 그 결과 야광충 개체수가 현저하게 증식하여 광양만 대부분의 정점에서 그들의 개체수 밀도가 높게 관찰되었다고 판단된다. 결과적으로 고염분 환경에 좋은 성장 조건을 갖춘 무각의 야광충은 하계에 상대적으로 저염분 수위가 빈번하게 형성되는 광양만에서 조차 높은 개체수가 관찰된 것은 규조류와 같이 운동성이 없는 작은 사이즈의 먹이생물이 야광충 증식에 중요한 역할을 한 것으로 판단된다.

야광충의 출현과 수문학적 환경요인과의 관계를 파악하기 위해서 상관성분석과 주성분분석을 수행하였다 (Tables 1 and 2). 먼저 동계에 야광충 개체수에 영향을 미친 것으로 Chl.a 농도( $r=0.74$   $p<0.05$ )로 판단되며, 이는 주성분분석에서도 동계 제1성분에서 pH, 용존산소, Chl.a 농도, 야광충개체수 등이 주성분의 28% 정도로 유의한 값이 나타난 것으로 보아, 동계 저수온기에 식물플랑크톤의 먹이농도의 증가는 야광충 개체수의 증식에 긍정적으로 영향을 미친 것으로 판단된다. 동계 제2성분

에서 영양염 (Nitrate+nitrite, Ammonium, DIN, DIN/DIP) 간에 양(+)의 유의한 값이 얻어진 것은 동계 강우가 관찰되지 않은 점으로 미루어 보아 영양염의 주요 공급원은 수층 혼합으로 저층에서부터 표층으로 일정량 공급되고 있다는 것을 시사한다. 춘계에 야광충 개체수에 영향을 미친 것으로 판단되는 환경요인으로는 식물플랑크톤 중 규조류 증가와 양의 상관성이 관찰되었고, 식물플랑크톤의 증가와 더불어 영양염과 식물플랑크톤 간의 음의 상관성이 관찰되었다. 주성분분석에서도 춘계 제1성분에서는 영양염류와 유의한 값이 제2성분에서는 Chl.a를 포함한 식물플랑크톤의 개체수와 유의한 값이 관찰되었다. 앞서 언급한 상관성 관계와 주성분에서의 제1성분과 제2성분이 잘 일치되고 있는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 통계적인 결과가 잘 뒷받침하듯이 춘계 식물플랑크톤은 영양염을 빠르게 흡수하여 증식하였고, 야광충의 일정한 개체수를 유지할 수 있었다는 것을 규조류의 증식에 의한 수주(water column)내 먹이원이 충분하게 존재하였기 때문으로 사료된다. 하계에는 주성분분석에서는 춘계와 유사한 경향이 관찰되었고, 상관성분석에서는 춘계와 반대로 야광충의 개체수는 식물플랑크톤의 개체수와 음의 상관성이 관찰되었다. 특히 광양만 외측 대부분의 정점에서 야광충의 높은 개체수 밀도가 관찰되었고, 이들 야광충은 식물플랑크톤 중 규조류를 현저



**Fig. 8.** Box plot of Chl.a, ammonium and *Noctiluca scintillans* during four seasons in the surface waters of Gwangyang Bay. Minimum and maximum are depicted by black dots, the box signifies the upper and lower quartiles, and the median and average is represented by short black lines and white dots, respectively.

하계 포식한 결과 규조류와 음의 상관성이 관찰된 것으로 사료된다. 추계에는 야광충의 개체수 밀도와 Chl.a와 양의 상관성이 관찰되었고, 주성분분석에서는 성분간의

명확한 경향이 관찰되지 않았다. 결론적으로 야광충의 개체수 밀도가 상대적으로 낮은 동계, 춘계, 추계에는 Chl.a와 양의 상관성이 관찰되었고, 야광충의 개체수 밀도가 높은 하계에는 Chl.a와 음의 상관성이 관찰되었다는 것은 포식압에 의한 영향이 강하게 반영되어, 야광충의 개체수 밀도가 높았을 때에는 먹이원인 식물플랑크톤을 현저하게 포식하였을 것으로 사료되었고, 나머지 계절에는 야광충의 개체수 유지에 식물플랑크톤의 증식이 일정량 기여한 것으로 판단되었다. 특히 야광충은 현저하게 증식한 후 사멸과정에서 수계내 다량의 암모니아를 방출하는 것으로 알려져 있으나 (Montani *et al.* 1998; Tada *et al.* 2000), 광양만에서는 야광충 개체수가 높게 출현하였을 때 상대적으로 암모니아의 농도는 야광충 개체수가 낮게 관찰된 춘계와 추계보다 낮게 관찰되었다 (Fig. 8).

적 요

광양만에서 야광충 *Noctiluca scintillans*의 개체군 동태를 파악하기 위해서 수계지리학적 및 생리생태학적 특성을 2010년부터 2012년까지 3년 동안 19 또는 20개 정점에서 조사를 수행하였다. 조사기간 동안 야광충은 하계의 수온범위가 15°C에서 22°C로, 염분이 25.0 psu에서 30.0 psu 사이의 환경조건에서 높은 밀도로 출현하였다. 이와 반대로, 그들의 개체군은 동계 4°C의 낮은 수온 조건에서도 출현하였으나, 동계를 비롯하여 춘계, 추계에는 야광충의 개체수가 현저하게 감소하였다. 특히 27°C 이상의 높은 수온과 12.0 psu 이하의 낮은 염분조건 환경에서는 야광충 개체수의 사멸로 이어졌다. 야광충의 먹이원인 Chl.a 농도와는 동계, 춘계, 추계에는 양(+)의 상관관계가 성립되었고, 하계 야광충의 높은 밀도가 관찰되었을 때에는 Chl.a 농도와 음(-)의 상관관계를 보였다. 이는 야광충의 포식압에 의한 영향으로 생각되며, 하계와 같이 야광충의 개체수밀도가 높았을 때에는 식물플랑크톤(Chl.a)을 현저하게 포식하여 음(-)의 상관관계를 나타내었을 것이고, 나머지 계절의 양(+) 상관관계는 야광충의 개체수를 유지하는데 일정량 먹이원이 필요하였다는 것을 의미한다.

사 사

본 연구는 한국연구재단을 통해 “교육과학기술부의 미래융합 융합기술 파이오니어 사업 (과제번호 M1071118001

=08M1118-00110)”과 한국해양과학기술원 연구과제 “남해특별관리해역의 관리를 위한 해양생태계 건강성 지수 개발(PE 98151)”의 지원으로 수행되었습니다. 현장조사에 도움을 주신 현봉길, 손문호, 김경희, 정진현, 이은선 연구원께 감사의 마음을 전합니다.

## REFERENCES

- Baek SH, HH Shin, DS Kim and YO Kim. 2011. Relationship between distributional characteristics of heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans* and environmental factors in Gwangyang Bay and Jinhae Bay. Korean J. Environ. Biol. 29:81-91.
- Baek SH, S Shimode, HC Kim, MS Han and T Kikuchi. 2009. Strong bottom-up effects on phytoplankton community caused by a rainfall during spring and summer in Sagami Bay, Japan. J. Mar. Syst. 75:253-264.
- Baek SH, S Shimode, MS Han and T Kikuchi. 2008. Population development of the dinoflagellate *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* during spring and early summer in Iwa Harbor, Sagami Bay, Japan. Ocean Sci. J. 43:49-59.
- Buskey EJ. 1995. Growth and bioluminescence of *Noctiluca scintillans* on varying algal diets. J. Plankton Res. 17:29-40.
- Dela-Cruz J, P Ajani, R Lee, T Pritchard and I Suthers. 2002. Temporal abundance patterns of the red tide dinoflagellate *Noctiluca scintillans* along the southeast coast of Australia. Mar. Ecol. Prog. Ser. 236:75-88.
- Elbrächter M and YZ Qi. 1998. Aspects of *Noctiluca* (Dinophyceae) population dynamics. pp. 315-335. In: Physiological ecology of harmful algal blooms (Anderson DM, AD Cembella and MG Hallegraeff eds.). Springer Verlag Berlin.
- Enomoto Y. 1956. On the occurrence and the food of *Noctiluca scintillans* (Macartney) in the waters adjacent to the west coast of Kyushu, with special reference to the possibility of the damage caused to the fish eggs by that plankton. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 22:82-89.
- Hansen PJ, L Miranda and R Azanza. 2004. Green *Noctiluca scintillans*: a dinoflagellate with its own greenhouse. Mar. Ecol. Prog. Ser. 275:79-87.
- Huang C and Y Qi. 1997. The abundance cycle and influence factors on red tide phenomena of *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) in Dapeng Bay, the South China Sea. J. Plankton Res. 19:303-318.
- Jang MC, K Shin, PG Jang and WJ Lee. 2010. Relationship between environmental factors and short-term variations of mesozooplankton during summer in Jangmok Bay, south coast of Korea. Ocean Polar Res. 32:41-52.
- Kang JH. 2010. Distributional characteristics and carrying capacity of the potentially risky species *Noctiluca scintillans* at international Korean seaports. Ocean Polar Res. 32:449-462.
- Kim DI, Y Matsuyama, S Nagasoe, M Yamaguchi, YH Yoon, Y Oshima, N Imada and T Honjo. 2004. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae). J. Plankton Res. 26:61-66.
- Kuroda I and S Saga. 1978. The distribution and ecology of *Noctiluca scintillans* in Ohsaka Bay. Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr. 32:56-67. (in Japanese)
- Le Fevre J and JR Grall. 1970. On the relationships of *Noctiluca* swarming off the western coast of Brittany with hydrological features and plankton characteristics of the environment. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 4:287-306.
- Lee YS, CK Kang, YK Choi and SY Lee. 2007. Origin and spatial distribution of organic matter at Gwangyang Bay in the fall. The Sea. 12:1-8.
- Miyaguchi H, T Fujiki, T Kikuchi, VS Kuwahara and T Toda. 2006. Relationship between the bloom of *Noctiluca scintillans* and environmental factors in the coastal waters of Sagami Bay, Japan. J. Plankton Res. 28:313-324.
- Montani S, S Pithakpol and K Tada. 1998. Nutrient regeneration in coastal sea by *Noctiluca scintillans*, a red tide causing dinoflagellate. J. Mar. Biotechnol. 6:224-228.
- Nagasoe S, DI Kim, Y Shimasaki, Y Oshima, M Yamaguchi and T Honjo. 2006. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the red dinoflagellate *Gyrodinium instriatum* Freudenthal et Lee. Harmful Algae 5:20-25.
- Nakamura Y. 1998. Biomass, feeding and production of *Noctiluca scintillans* in the Seto Inland Sea, Japan. J. Plankton Res. 20:2213-2222.
- National Oceanographic Research Institute. 2002. Tidal current charts (Approaches to Gwangyang Hang). Ministry of Maritime Affairs and Fisheries Republic of Korea. 11-1520290-0000048-14.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford, 173pp.
- Qi Y, Z Zhang and Y Hong. 1993. Occurrence of red tides on the coasts of China. pp. 43-46. In Toxic Phytoplankton Bloom in the Sea (Smayda TJ and Y Shimizu eds.). Elsevier Science Publishers.
- Schaumann K, D Gerdes and KJ Hesse. 1988. Hydrographic and biological characteristics of a *Noctiluca scintillans* red tide in the German Bight. Meeresforschung 32:77-91.
- Sekiguchi H and T Kato. 1976. Influence of *Noctiluca*'s preda-

- tion on the *Acartia* population in Ise Bay, Central Japan. J. Oceanogr. Soc. Japan 32:195-198.
- Sriwoon R, P Pholpunthin, T Lirdwitayaprasit, M Kishino and K Furuya. 2008. Population dynamics of green *Noctiluca scintillans* (dinophyceae) associated with the monsoon cycle in the upper Gulf of Thailand. J. Phycol. 44:605-615.
- Sweeney BM. 1971. Laboratory studies of green *Noctiluca* from New Guinea. J. Phycol. 7:53-58.
- Tada K, S Pithakpol, R Yano and S Montani. 2000. Carbon and nitrogen content of *Noctiluca scintillans* in the Seto Inland Sea, Japan. J. Plankton Res. 22:1203-1211.
- Tada K, S Pithakpol, R Yano and S Montani. 2004. Seasonal variation in the abundance of *Noctiluca scintillans* in the Seto Inland Sea, Japan. Plankton Biol. Ecol. 51:7-14.
- Uhlir G and G Sahling. 1990. Long-term studies on *Noctiluca scintillans* in the German Bight population dynamics and red tide phenomena 1968-1988. Neth. J. Sea Res. 25:101-112.
- Umani SF, A Beran, S Parlato, D Virgilio, T Zollet, AD Olazabal, B Lazzarini and M Cabrini. 2004. *Noctiluca scintillans* Macartney in the Northern Adriatic Sea: long-term dynamics, relationships with temperature and eutrophication, and role in the food web. J. Plankton Res. 26:545-561.
- Yoo JK, SH Youn and JK Choi. 2006. Temporal fluctuation and ecological characteristics of *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) in the coastal waters of Incheon, Korea. Korean J. Environ. Biol. 24:372-379.
- Zingone A and HO Enevoldsen. 2000. The diversity of harmful algal blooms: a challenge for science and management. Ocean Coast. Manage. 43:725-748.

Received: 17 October 2013

Revised: 10 November 2013

Revision accepted: 11 November 2013