

광양만과 진해만에서 종속영양외편모조류 *Noctiluca scintillans*의 분포특성과 환경인자와의 관계

백승호* · 신현호 · 김동선¹ · 김영옥

한국해양연구원 남해연구소, ¹한국해양연구원 본원

Relationship between Distributional Characteristics of Heterotrophic Dinoflagellate *Noctiluca scintillans* and Environmental Factors in Gwangyang Bay and Jinhae Bay

Seung Ho Baek*, Hyeon Ho Shin, Dong Sun Kim¹ and Young Ok Kim

Korea Ocean Research and Development Institute/South Sea Institute, Geoje 656-830, Korea
¹Marine Environment Research Department, KORDI Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract – To understand the spatio-temporal fluctuations and ecological characteristics of heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans*, we investigated their population densities and environmental factors during four seasons at 20 stations of Gwangyang Bay and at 23 stations of Jinhae Bay in 2010. *N. scintillans* was seasonally abundant during spring and summer, with temperature ranging 15 to 27°C in the both bays, whereas the density reduced in fall and winter. The populations of *N. scintillans* at each station in both bays showed a significantly positive relationship with water temperature, indicating that relatively high water temperature within its optimum temperature stimulates the growth of *N. scintillans* population. In particular, low water temperature (< 4°C) and salinity (< 12 psu) led to disappear of *N. scintillans* population, although they were observed at all season in both bays. Spatio-temporal variations of Chl.a concentration was not significantly correlated with *N. scintillans* population densities. However, the *Noctiluca* abundances were also high during spring and summer season when relatively high Chl.a concentration was observed in both bays. This result suggests that standing crops of phytoplankton may be one of important contributing factors to enhance the abundance of *N. scintillans*.

Key words : *Noctiluca scintillans*, Chl.a, temperature, salinity, Gwangyang Bay, Jinhae Bay

서 론

야광충 *Noctiluca scintillans*는 잡식성 종속외편모조류로서 그들 세포의 식포내에서는 미소조류와 동물플랑크

톤의 란(알) 등이 많이 함유되어 있으며, 외편모조류이면서 일차 생산자를 포식하는 일차소비자의 역할을 한다(Enomoto 1956; Sekiguchi and Kato 1976; Nakamura 1998). 야광충은 적조원인생물으로서 독성물질을 생성하지 않지만, 암모니아 농도를 증가시켜 어류폐사의 직간접적 원인이 되며(Hallegraeff 1993; Montani *et al.* 1998; Tada *et al.* 2000), 그들의 대발생은 인간의 레저활동을

*Corresponding author: Seung Ho Baek, Tel. 055-639-8513, Fax. 055-639-8509, E-mail. baeksh@kordi.re.kr

비롯하여, 해양생태계에서 부정적 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Zingone and Enevoldsen 2000; Umani *et al.* 2004). 한편, 적조 생물을 포식하여 제거함으로써 자연 상태에서 적조 생물의 잠재적인 독성 요소를 감소시키는 중요한 역할과 더불어 N과 P기원의 영양염류를 수주내 방출하여 다른 식물플랑크톤의 성장에 도움을 주는 역할도 병행한다 (Montani *et al.* 1998; Tada *et al.* 2000; Rodríguez *et al.* 2005; 백 등 2008). 야광충의 개체군은 대부분 표층에서 대증식을 형성하며, 바람, 조류, 해류 등으로 수동적으로 이동하면서 모이고 흩어지기를 반복한다 (Huang and Qi 1997). 결과적으로 이들 개체군의 수평적인 확산 및 집적에 따른 불균등 분포특성은 야광충의 대발생 기작과 관련한 생태학적인 연구의 어려움을 초래한다.

일반적으로 야광충의 개체수는 수온, 염분, 용존산소, 무기영양염, 먹이농도 등에 의하여 조절되며 (Uhlrig and Sahling 1990; Huang and Qi 1997; Dela-Cruz *et al.* 2003; Umani *et al.* 2004), 외편모조류의 증식에 중요한 역할을 하는 수괴의 안정성 또한 야광충의 개체수를 조절하는 중요한 인자라고 할 수 있다 (Miyaguchi *et al.* 2006). Miyaguchi *et al.* (2006)에 의하면, 일본 사가미 만에서의 *N. scintillans*의 적조는 풍속과 풍향에 따라 적조규모의 차이는 있었으나 매년 3월에서 7월 사이에 비교적 빈번히

발생한다. 그들의 대발생은 만 외측(offshore)에서 산발적으로 증식한 개체수가 바람에 의하여 연안해역으로 집적되어 야광충의 개체수가 일정 수준에 도달했을 때, 적정 환경 조건(먹이, 수온 및 수괴 안정도 등)이 갖추어지면 폭발적으로 증식하여 거대한 적조를 형성한다 (Miyaguchi *et al.* 2006). 국내에서 수행된 야광충 분포특성에 관한 연구는 인천 연안(유 등 2006)과 장목만(강 등 2005; 장 등 2010)에서의 시간적 변동과 생태특성 연구가 수행되었으며, 최근 잠재적 외래 위협종의 관점에서 국제항만(부산항, 광양항, 인천항)을 중심으로 야광충의 분포특성과 수용능력을 언급한 것이 전부이다 (강 2010). 결과적으로 우리나라에서는 야광충의 분포특성과 생태학적 연구는 일부 연구진에 의해 극히 제한된 해역에서 산발적으로 수행된 것에 불과하다고 하겠다.

본 연구는 광양만과 진해만에서 종속영양외편모조류 *N. scintillans*의 계절적 분포와 환경인자간의 관계를 통해 생태학적 특성을 이해하고자 한다.

재료 및 방법

종속영양외편모조류 *N. scintillans*의 개체군은 대부분

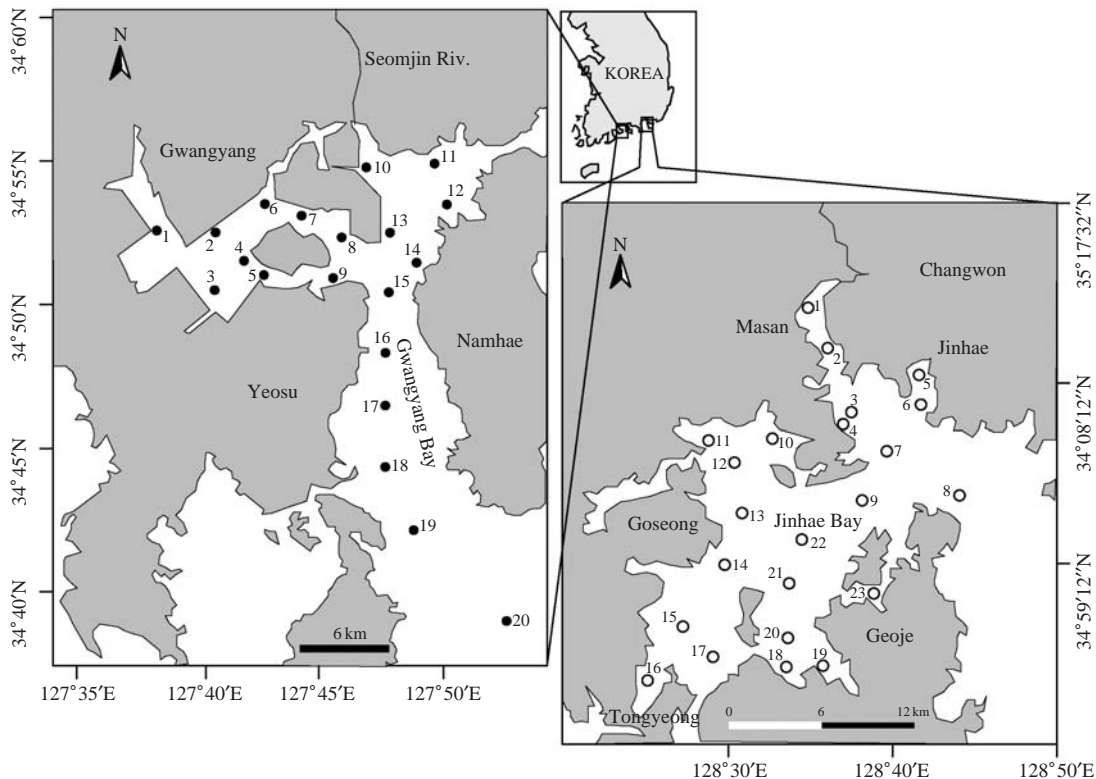


Fig. 1. Map of sampling stations in Gwangyang and Jinhae Bays.

표층에서 바람, 조류, 해류 등의 요인에 의해서 수동적으로 확산과 소멸을 반복하기 때문에 표층부를 제외한 다른 수층에서는 개체수가 급격히 감소한다. 따라서 동물 플랑크톤을 채집하는 네트로 저층에서 표층까지 수직인양하는 방법은 개체수가 존재하지 않는 수층의 여과 수율(filter rate)까지 확산되기 때문에 그들의 개체수를 정확하게 정량적으로 산출하지 못하는 단점이 있다. 본 조사에서는 이와 같은 점을 고려하여 표층부에 분포하는 야광충의 개체수를 산출하기 위해서 표층수를 버킷으로 채수한 후 농축하여 개체수를 산출하는 방법을 선택하였다. 조사는 섬진강의 영향을 크게 받는 광양만과 반폐쇄적이면서 도시의 영향을 강하게 받는 진해만에서 야광충의 계절적 분포 특성을 조사하였다(Fig. 1). 조사는 광양만 20개 정점과 진해만 23개 정점에서 2010년 동계(2/8~12일), 춘계(5/4~7일), 하계(8/24~27일), 추계(11/23~26일)에 각각 수행하였다. 현장에서 수온, 염분, pH는 수질측정기로 측정하였고(CTD), 투명도는 선상에서 Secchi disc를 이용하여 측정하였다. 표층수를 버킷으로 채수하여 입자성 부유물질(SS: suspended solids), Chlorophyll *a* (Chl.*a*), 용존산소(DO: dissolved oxygen), 영양염 농도, 야광충 *N. scintillans*의 개체수를 각각 산출하였다. 부유물질(SS)은 GF/F필터로 표층해수(200~300 mL)를 여과한 후 건중량의 무게로 산출하였다. Chl.*a* 농도 측정을 위해서 표층수 300~1,000 mL를 선상에서 GF/F필터(47 mm Whatman glass fiber filters)로 여과하였고, 그 필터는 15 mL 튜브에 넣어 냉동보관하였다. 용존산소는 표층수를 용존산소병에 채수하여 윙클러법으로 측정하였다. 영양염 분석용 시료는 GF/F필터를 통과한 여과 해수 20 mL를 30 mL PC병에 넣고 냉동보관하였다. Chl.*a* 농도는 냉동 보관한 여과지를 90% acetone에 넣고 24시간 냉암소에서 엽록소를 추출한 후 형광측정기(Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 분석하였다(Parsons *et al.* 1984).

영양염류는 냉동 보관한 시료를 분석 전 해동하여 규산염(SiO₂), 암모니아성 질소(NH₄-N), 아질산과 질산성 질소(NO₂-N, NO₃-N), 인산염(PO₄-P)을 Parsons *et al.* (1984)의 분석법에 따라서 Auto Analyzer(Bran Luebbe)로 분석하였다.

표층부의 야광충 현존량은 500~1,000 mL의 샘플을 루골 용액으로 고정된 후 200 μm 망목으로 10 mL로 농축시킨 후 해부현미경의 저배율로 모든 세포를 계수하였다. 야광충과 환경인자 간의 관계를 파악하기 위해서 CANOCO 4.5 software를 이용하여 CCA(Canonical Correspondence Analysis)분석을 수행하였다.

결 과

1. 환경요인

광양만 20개 정점과 진해만 23개 정점의 수온 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 광양만의 연간 수온변동은 하계(24.6±0.7°C), 춘계(17.9±1.3°C), 추계(13.3±0.8°C), 동계(6.3±0.8°C) 순으로 높게 나타났고, 각 계절별로 정점간의 수온차이는 3~5°C 범위내로 변동하였다. 동계 최저치는 정점 3 표층에서 4.7°C를, 최고치는 정점 20에서 7.6°C로 관찰되었고, 특히 만 내측정점의 수심이 얇은 정점에서 극히 낮게, 만외측으로 갈수록 수온이 점차적으로 증가하는 경향이 관찰되었다. 춘계는 16°C에서 20.7°C로, 하계는 23.8°C에서 25.9°C로, 추계는 11.8°C에서 14.5°C로 각각 변동하였다. 진해만의 연간 수온변동도 하계(27.6±0.9°C), 춘계(16.1±0.8°C), 추계(14.5±0.4°C), 동계(6.3±0.6°C) 순으로 높게 나타났으나, 정점간의 수온변동은 광양만보다 크지 않았다. 진해만은 광양만보다 하계에 평균 3°C 정도 높게 나타나 같은 시기 두 해역간의 수온차이를 확인하였다.

광양만과 진해만의 염분 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 광양만의 염분변동은 섬진강의 영향을 받아 계절별, 정

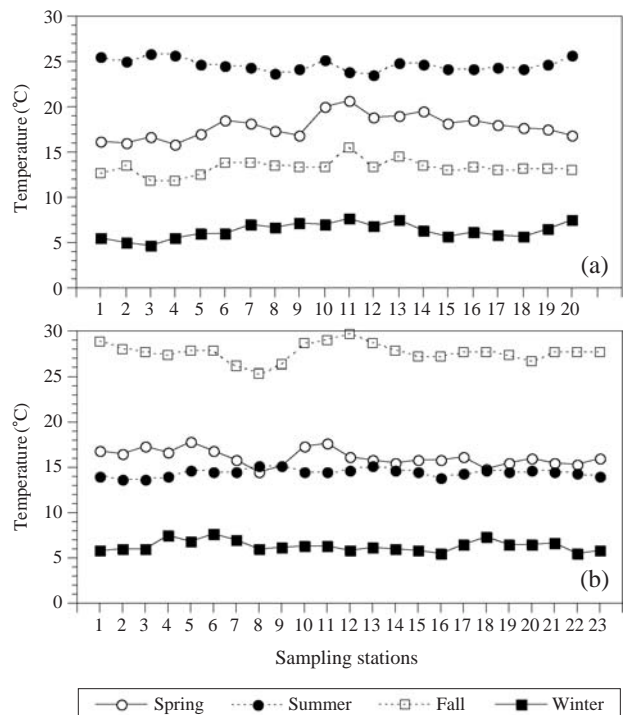


Fig. 2. Temporal variations of water temperature in surface water at 20 stations of Gwangyang Bay and at 23 stations of Jinhae Bay during four seasons in 2010.

점별로 극히 심하게 변동했고, 그 현상은 하계와 춘계에 현저했다. 염분이 가장 낮게 관찰된 하계 평균은 24.4 ± 4 psu로, 다음으로 춘계 25.8 ± 4 psu, 동계 32.7 ± 0.8 psu, 추계 33.2 ± 0.4 psu 순으로 낮게 관찰되었다. 특히 섬진강하구 정점 10에서 춘계와 하계에 12 psu 전후로 낮게 관찰되었고, 외측의 정점 20에서 모든 계절 높은 염분농도 ($29.6 \sim 33.8$ psu)를 기록하였다. 진해만 염분농도의 계절적 분포특성은 광양만과 유사하였다. 진해만에서는 추계와 동계 정점 4를 제외한 모든 정점에서 유사하게 높은 농도를 나타낸 반면, 춘계는 28 psu 전후로 일괄적으로

낮게 기록되었다. 최저염분은 하계 (25.3 ± 1.9 psu)에 관찰되었고, 각 정점별로 현저한 차이를 보였다. 특히 하계에는 진해만 전 해역에 걸쳐 저염분 수괴가 형성되었다.

광양만의 투명도는 춘계를 제외하면 만 내측 정점에서 모든 계절 1~2 m 전후로 극히 낮았고, 만 외측으로 갈수록 조금씩 증가하였다. 진해만은 계절별로 큰 차이를 보였으나, 마산만 최내측 정점과 행암만 정점은 연중 낮은 투명도 (1~3 m)를 기록하였다 (Fig. 4). 광양만은 진해만과 비교하여 투명도가 상대적으로 낮았고, 반대로 부유성 입자물질은 압도적으로 높게 나타났다 (Fig. 4). 즉 광양만은 하계를 제외하면, 만의 지리적인 특성상 수심이 얇아 수층혼합이 활발하게 나타난 결과, Chl.a 기원이 아닌 입자성부유물질이 표층에 높게 나타나 투명도를 저하시켰다고 판단된다.

광양만 Chl.a 농도의 변동은 하계 $1.58 \sim 33.26 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균: $14.05 \pm 11.32 \mu\text{g L}^{-1}$), 동계 $1.46 \sim 4.70 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균: $2.88 \pm 1.12 \mu\text{g L}^{-1}$), 춘계 $0.61 \sim 5.04 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균: $2.74 \pm 1.19 \mu\text{g L}^{-1}$), 추계 $1.42 \sim 3.33 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균: $1.77 \pm 0.49 \mu\text{g L}^{-1}$) 순으로 높게 관찰되었다. 하계는 광양만 내측에서 극히 높은 농도가 관찰된 반면, 추계에는 만 외측정점에서 약간 높게 나타났다 (Fig. 5 좌측). 진해만의 Chl.a는 하계 $1.65 \sim 41.78 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균: $9.04 \pm 9.52 \mu\text{g L}^{-1}$), 추계 $1.35 \sim 15.83 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균: $7.19 \pm 4.09 \mu\text{g L}^{-1}$), 춘계 $1.70 \sim 15.03 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균: $4.34 \pm 3.66 \mu\text{g L}^{-1}$), 동계 $0.73 \sim 8.34 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균: $3.21 \pm 2.30 \mu\text{g L}^{-1}$) 순으로 높게 관찰되었다. 진해만은 마산만과 행암만 부근의 정점 1~6에서 모든 계절에 높은 Chl.a 농도가 관찰되었고, 진해만 중앙수역과 서부해역의 정점에서는 상대적으로 낮게 관찰되었다 (Fig. 5 우측).

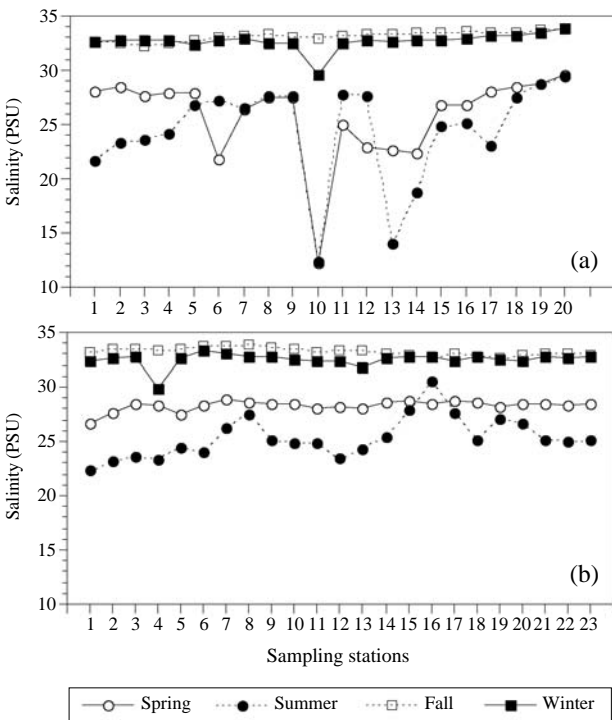


Fig. 3. Temporal variations of salinity from surface water at 20 stations of Gwangyang Bay and at 23 stations of Jinhae Bay during four seasons in 2010.

2. 야광충 *Noctiluca scintillans* 출현개체수의 분포특성

광양만과 진해만의 야광충 *N. scintillans* 개체수 변동은

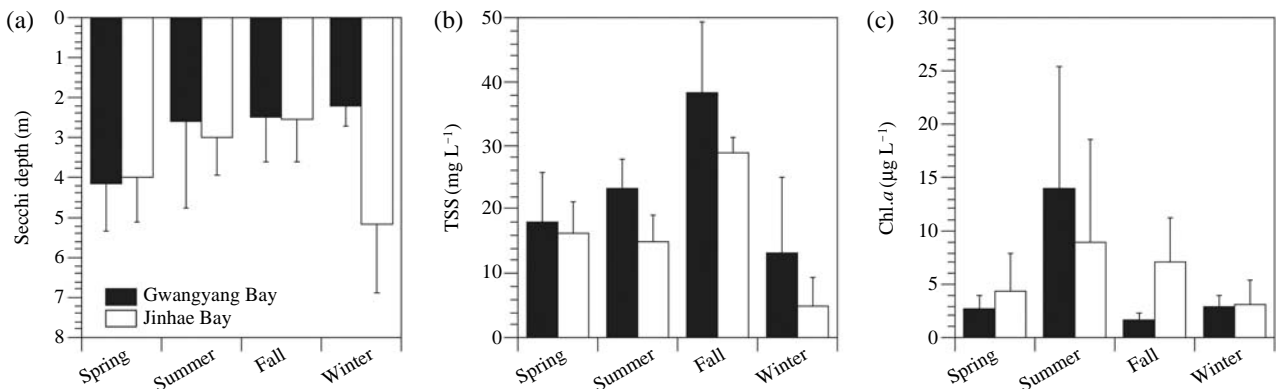


Fig. 4. Comparison of abiotic (a: secchi depth; b: suspended solids) and biotic factors (c: Chl.a) in Gwangyang and Jinhae Bays.

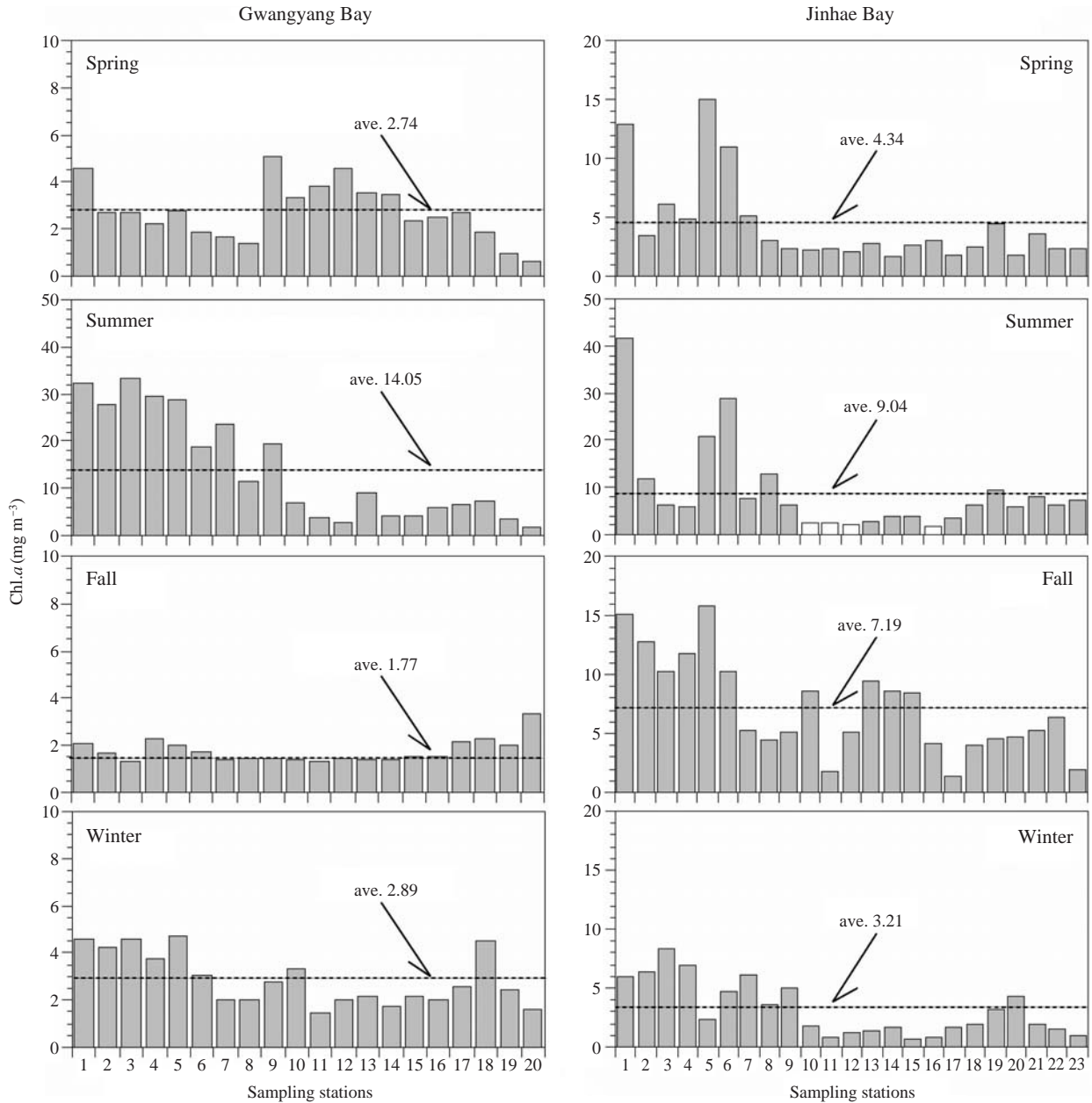


Fig. 5. Temporal variations in Chl.a concentration in surface water at 20 stations of Gwangyang Bay and at 23 stations of Jinhae Bay during four seasons in 2010. Dot lines indicates average of Chl.a.

Fig. 6에 나타내었다. 광양만에서 *N. scintillans*는 하계, 춘계, 동계, 추계 순으로 나타났고, 최고치는 하계 정점 20에서 1,142 indiv. L⁻¹로 관찰되었다. 상대적으로 춘계와 추계는 내만을 중심으로 높게 나타났고, 하계는 만 외측으로 향하는 정점 15에서 20사이에서 극히 높은 밀도를 보였다. 동계는 뚜렷한 경향은 관찰되지 않았으나, 대부분 정점에서 10~30 indiv. L⁻¹로 낮게 유지되었다. 진해만에서도 광양만과 같은 하계, 춘계, 동계, 추계 순으

로 높게 관찰되었다. 진해만은 광양만과 비교하여 상대적으로 낮은 개체수가 관찰되었고, 추계는 일부 정점을 제외한 대부분의 정점에서 그들 개체수를 관찰할 수 없었다. 조사기간 동안 두 해역에서 적조를 형성한 때는 관찰되지 않았다.

야광충 *N. scintillans*의 먹이원인 식물플랑크톤의 현존량을 기증하는 Chl.a 농도와 환경인자와의 관계를 Table 1에 나타내었다. Chl.a 농도는 광양만 ($r=0.53$)과 진해만

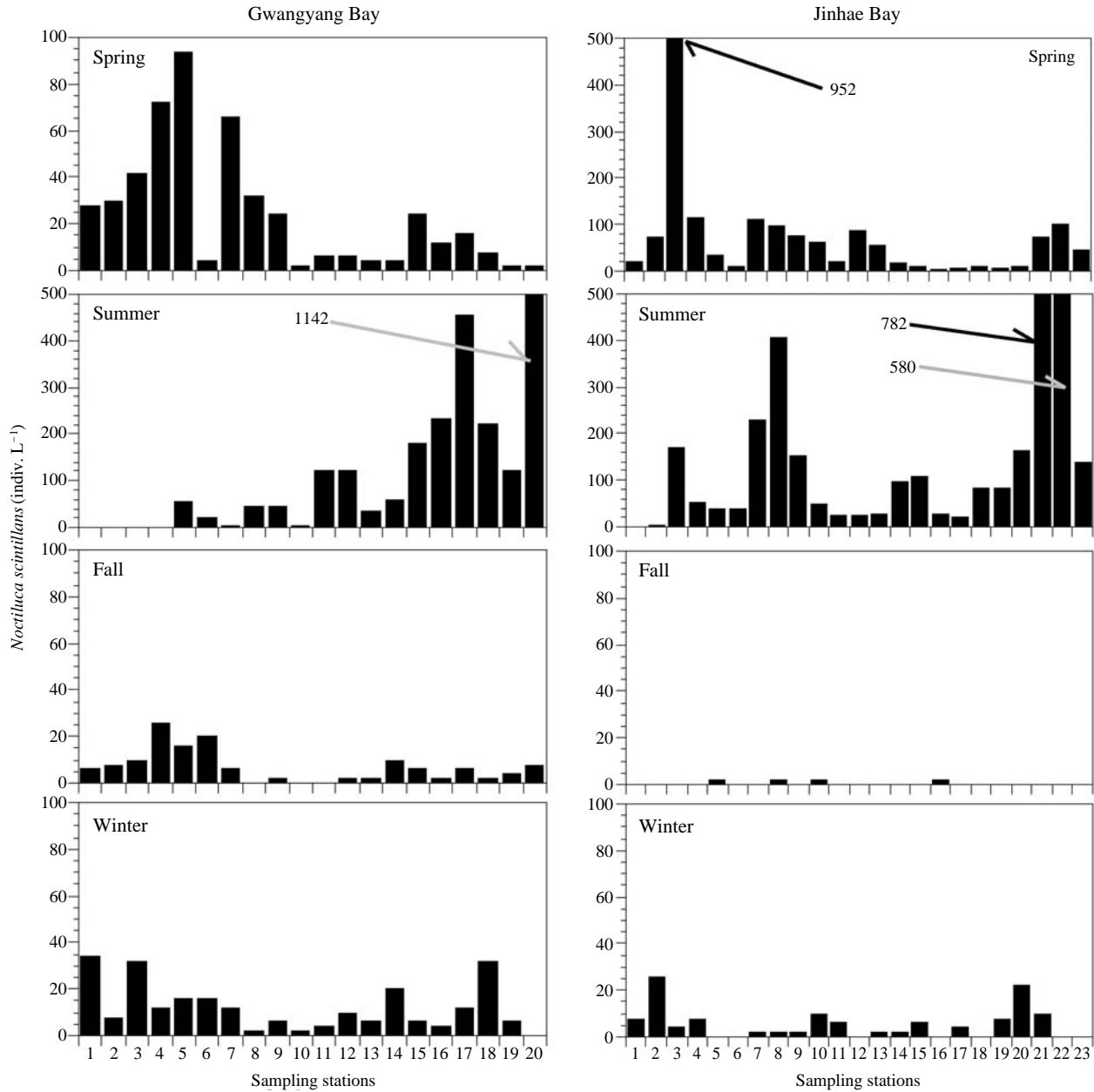


Fig. 6. Temporal variations in *Noctiluca scintillans* population densities in surface water at 20 stations of Gwangyang Bay and at 23 stations of Jinhae Bay during four seasons in 2010.

($r=0.35$)에서 수온과 유의한 정(+)의 관계가 성립되었고($p<0.0001$), 염분은 음(-)의 상관관계가 형성되었다(광양만: $p<0.001$, 진해만: $p<0.01$). 또한 영양염 농도와는 광양만에서는 인산염의 농도와, 진해만은 질산염의 농도와 유의한 정(+)의 관계를 보였다. 야광층의 개체수는 각 정점별 Chl.a 농도와의 상관성은 관찰되지 않았으나(Table 2), 전반적으로 Chl.a가 높은 층계와 하계에 *N. scintillans*의 개체수가 높게 나타났다. *N. scintillans*는 두 해역에서 수온과 유의한 정(+)의 관계를 보였으나

(광양만: $r=0.30$, 진해만: $r=0.35$) ($p<0.01$), 다른 환경인자와는 뚜렷한 관계를 관찰할 수 없었다. CCA(Canonical Correspondence Analysis)분석에서도 *N. scintillans*의 개체수는 두 해역에서 수온과는 낮은 정(+)의 관계를 형성하였고, 진해만에서 염분과의 낮은 음(-)의 관계를 관찰하였다(Fig. 7). *N. scintillans*의 개체수와 다른 환경요인과는 뚜렷한 관계가 성립되지 않았으나, Chl.a는 수온과 일부 영양염 농도와 유사한 방향으로 위치하고 있어 일정한 정(+)의 관계가 성립되었다.

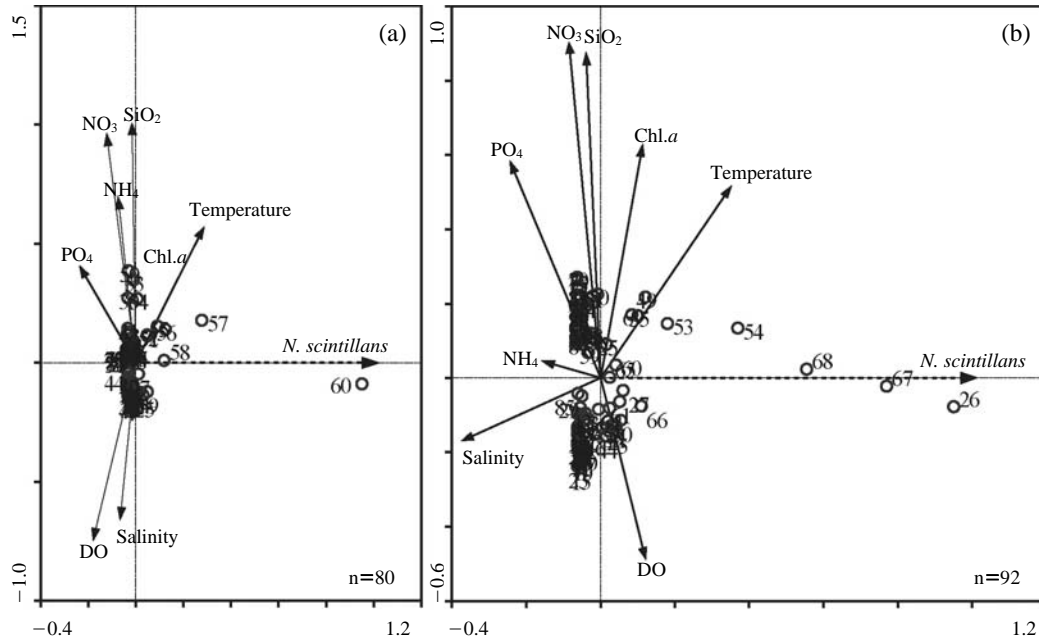


Fig. 7. Relationship between environmental factors and *Noctiluca scintillans* population densities by canonical correspondence analysis (CCA). a: Gwangyang Bay, b: Jinhae Bay

Table 1. Correlations between environmental parameters and Chl. *a* concentrations in the surface layer at 20 stations in Gwangyang Bay and at 23 stations in Jinhae Bay

Study sites (bay)	Parameter	r-values	p-values
Gwangyang	Temperature	0.53	< 0.0001
	Salinity	-0.39	< 0.001
	Secchi depth	-0.36	< 0.001
	pH	-0.20	< 0.1
	PO ₄	0.35	< 0.01
	NH ₄	-0.07	0.54
	SiO ₃	0.11	0.34
	NO ₃	0.08	0.48
Jinhae	DO	-0.26	< 0.01
	Temperature	0.35	< 0.0001
	Salinity	-0.27	< 0.01
	Secchi depth	-0.57	< 0.0001
	pH	0.06	0.58
	PO ₄	0.04	0.67
	NH ₄	0.12	0.26
	SiO ₃	0.16	0.13
Jinhae	NO ₃	0.37	< 0.001
	DO	0.00	0.98

Table 2. Correlations between environmental parameters and *Noctiluca scintillans* population densities in the surface layer at 20 stations in Gwangyang Bay and at 23 stations in Jinhae Bay

Study sites (bay)	Parameter	r-values	p-values
Gwangyang	Temperature	0.30	< 0.01
	Salinity	-0.07	0.49
	Secchi depth	0.42	< 0.0001
	pH	-0.04	0.7
	PO ₄	-0.18	0.09
	NH ₄	-0.03	0.77
	SiO ₃	-0.01	0.93
	NO ₃	-0.05	0.66
	DO	-0.17	0.12
	Chl. <i>a</i>	-0.05	0.67
Jinhae	Temperature	0.35	< 0.001
	Salinity	-0.36	< 0.001
	Secchi depth	-0.17	< 0.1
	pH	-0.15	0.14
	PO ₄	-0.23	0.03
	NH ₄	-0.08	0.45
	SiO ₃	-0.08	0.43
	NO ₃	-0.08	0.43
	DO	0.14	0.16
	Chl. <i>a</i>	0.04	0.64

고찰

본 조사기간 동안 *N. scintillans*는 수온 4.7~27.7°C 범위에서 출현하였고, 하계 마산만의 최 내측정점 1에서 29°C의 수온이 관찰되었을 때에는 그들의 개체가 관찰되지 않았다. 강(2010)과 유 등(2006)에 의하면, 우리나라

라 주요항만, 인천항, 부산항, 광양항에서 *N. scintillans*의 출현수온 범위는 2.1~26.4°C로, 5°C 이하의 조건에서도 생존하였다고 보고했다. 일본 Sagami Bay에서는 14.5~22.8°C의 수온범위를 보였고(Miyaguchi *et al.* 2006), 세토내해에서는 춘계에서 하계에 걸쳐서 현저한 증식을

보였으나, 동계의 저수온(10°C)과 하계의 고수온(27°C)에서는 출현하지 않았다(Tada *et al.* 2004). 아열대성 해역인 중국의 Dapeng Bay에서는 15.8~28.6°C의 수온범위에서 이들 생물의 출현을 보고하였고, 25°C 이상이면 개체수가 급격히 감소하는 경향을 보였다(Huang and Qi 1997). 본 연구에서는 저수온(>4°C, <10°C)과 고수온(<28°C)에서도 성장이 가능하였고, 그들은 15~27°C의 수온조건에서 높은 개체수밀도를 기록하였다. 또한 *N. scintillans*은 두 해역에서 수온과 유의한 정(+)의 상관성이 관찰되었다는 것은 수온의 증가와 더불어 그들의 증식도 빨라진다는 것을 의미할 수 있다(Table 2). Tada *et al.* (2004)의 배양실험에 의하면, 분리 배양한 *N. scintillans*의 성장은 10°C에서도 증식능을 유지하였고, 15~25°C에서 >0.8 d⁻¹의 높은 성장율을 보고하였다. 특히 27°C부터 성장율이 급격히 떨어져 0.1 d⁻¹를 보였고, 28°C에서는 부(-)의 성장율을 보고하였다. 한국과 인접한 주변해역에서 *N. scintillans*의 출현 수온범위를 종합적으로 요약하면, 3~28°C로 광범위한 수온에서 적응가능하였고, 그들의 최적 수온은 15~25°C로 생각된다. 특히 한국연안해역에서 출현하는 *N. scintillans*는 저온에 대한 강한 적응력이 있는 것으로 판단되며, 아열대해역에서조차 보고되지 않은 28°C 부근의 수온에서도 성장 가능하였다. 결과적으로 우리나라 주변에서 출현하는 *N. scintillans*는 수온범위가 광범위하여 모든 계절에 출현 가능하다고 판단되며, 3월에서 7월 사이 수온의 증가와 더불어 그들의 증식도 왕성하게 일어나 적조발생 가능성이 높다. 이후 8월과 9월의 고수온에 그들이 개체수가 급격히 감소하지만, 10월부터 이듬해 2월까지 하강하는 낮은 수온조건에서도 *N. scintillans*의 일정 개체가 유지된다. 즉 휴면포자(cyst)의 형성이 보고되지 않은 *N. scintillans*는 항상 수주내 유영세포가 존재하고 있고, 최적의 수온 또한 다른 중속영양외편모조류와 비교하여 상당히 넓어 대발생 할 잠재적 가능성이 높다. 또한 풍선모양의 공기 주머니와 같은 형태학적 특성(집적과 확산이 용이함) 때문에 바람과 조류 등의 물리적인 요인에 의하여 연안해역에 쉽게 집적되어 춘계, 하계, 추계에 걸쳐 적조를 쉽게 관찰할 수 있는 종특이적인 특성을 지녔다(Enomoto 1956; Buskey 1995; Miyaguchi *et al.* 2006).

광양만과 진해만에서 *N. scintillans*는 염분이 12.2~33.4 psu 범위에서 출현하였으며, 23.1~29.5 psu 사이에서 출현개체수가 높게 나타났다. 유 등(2006)은 인천연안에서 염분이 17.1 psu로 낮게 관찰되었을 때 *N. scintillans*의 출현이 관찰되지 않았으나, 본 연구에서는 섬진강의 영향을 강하게 받는 정점 10(염분 12.2 psu)에서 낮은 개체수가 관찰되었다. Huang and Qi (1997)의 보고에 의

하면 Daepeng만에서 *N. scintillans*는 19.1~33.4 psu 범위에서 출현하였으며, 29 psu 이상에서 대증식이 일어났고, 27 psu 이하에서는 개체수가 급격히 감소하여 염분이 12 psu 이하로 떨어지면 개체군이 소멸하였다. Sagmi Bay의 서부해역(수심 120 m로서 외양과 쿠로시오의 영향을 강하게 받는 정점)에서 월별로 7년간 수행한 연구에 의하면, 염분이 33.6~35 psu 조건에서 높은 밀도의 *N. scintillans*의 개체수가 관찰되었고(Miyaguchi *et al.* 2006), 동일해역의 연안 부두(harbor)에서 춘계와 하계기간에 일일 모니터링한 조사에 의하면 100 mm 이상의 강우가 관찰된 후 염분이 33 psu에서 23.7 psu로 급격히 하강하였을 때 *N. scintillans*의 개체수는 급격히 감소하였다(Baek *et al.* 2009). 해양에 서식하는 대부분의 외편모조류는 최적의 염분 차이를 보이지만 저염분내성은 10~14 psu로 보고되고 있고(Yamaguchi *et al.* 1997; Kim *et al.* 2004; Nagasoe *et al.* 2006; Baek *et al.* 2007), *N. scintillans*와 같은 무각을 형성하는 종은 극히 낮은 염분(<10 psu)에 적응이 어렵다(Kim *et al.* 2004; Nagasoe *et al.* 2006). 특히 하계에 우리나라 남해안 연안일대에서 빈번히 적조를 유발하는 무각 외편모조류 *Cochlodinium polykrikoides*의 고온, 고염에서 최적의 조건을 가지고 있고, 염분이 30 psu 이하의 내만에서는 출현하지 않았다(Lee and Lee 2006; Lee 2008). 유 등(2006)에 의하면, *N. scintillans* 출현 개체수는 강우와는 직접적인 상관성이 관찰되지 않았으나, 월 평균에 해당되는 3구간 이동평균의 결과에서 강우가 적은 시기에 출현개체수가 높았고, 강우가 많은 시기에 출현 개체수가 낮게 관찰되었다. 본 연구에서는 *N. scintillans* 출현 개체수와 염분은 어떤 상관성도 관찰되지 않았으나(Table 2), 춘계와 하계 광양만과 진해만에서 상대적 저염분 수괴(20~25 psu)가 형성되었을 때 높은 개체수를 관찰하였다. 상기의 연구를 종합해 보면 *N. scintillans*는 12 psu 전후에서 저염분에 대한 한계농도라고 판단되며, 고염분(>30 psu)은 좋은 성장조건이라고 할 수 있고, 상대적으로 저염분수계에서도 증식이 가능하다고 판단된다. 즉, 염분은 무각의 중속영양외편모조류 *N. scintillans*의 출현과 소멸양상에 중요한 영향을 미치는 요인 중 하나라고 판단된다.

야광충 *N. scintillans*은 중소형 동물플랑크톤, 알(egg), 원생생물등을 먹이원으로 이용하지만, 주된 먹이원은 식물플랑크톤이다(Enomoto 1956; Buskey 1995). 또한 어떤 식물플랑크톤을 먹이로 포식 및 공생하는가에 따라 핑크색의 적조를 형성할 수 있고, 그린색의 적조(green tide)를 형성할 수 있다. 온난해역에서 서식하는 종은 주로 핑크색을 형성하고(Dela-Cruz *et al.* 2003; 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 그린색의 적조를 형성한다(Sweeney 1976; Hansen *et al.* 2004). 일본의 세토내해에서는 부영양화와 *N. scintillans*의 적조발생빈도와 상관성이 있다고 하였다(Kuroda and Saga 1978). 중국에서도 부영양화 현상은 먹이감의 대증식을 유발하기 때문에 야광충 적조발생의 주된 원인으로 파악되었다(Qi *et al.* 1993; Hung and Qi 1997). 본 연구에서도 광양만과 진해만 두 해역에서 Chl.a 농도의 증가는 염분감소와 더불어 영양염 증가에 따라서 뚜렷하게 관찰되었다($p < 0.01$). 식물플랑크톤 중 규조류는 온난해역에서 야광충의 가장 중요한 먹이원으로 알려져 있다(Enomoto 1956; Miyaguchi *et al.* 2006). 야광충의 개체수와 Chl.a 농도와의 직접적인 상관성은 본 연구에서는 관찰되지 않았지만, 하계에 광양만 내만을 중심으로 규조류 *Skeletonema costatum*의 단일종이 극우점한 결과, 그리고 진해만에서 규조류 *Pseudo-nitzschia* spp.가 현저하게 증식하여 먹이원이 충분히 존재했기 때문에 *N. scintillans*의 개체수 밀도가 두 해역에서 높게 관찰되었다고 생각된다. 강(2010)의 결과에서는 야광충의 출현량과 Chl.a 농도와는 상관관계가 잘 나타나지 않았는데, 이는 먹이 농도에 대한 포식효과가 시간간격(time lag)을 두고 나타났기 때문으로 언급하였다. 본 연구에서도 동시기 같은 정점에서 Chl.a 농도와는 *N. scintillans*의 개체수와의 상관성이 나타나지 않은 것은 강(2010)의 연구결과와 일치하였고, 이는 야광충의 형태학적 특성상 물리적인 영향을 강하게 받아 집적 및 확산이 용이하여 불균일하게 분포된 것으로부터 기인되었다고 생각된다. 결과적으로 고염분 환경에 좋은 성장 조건을 갖춘 무각의 야광충 *N. scintillans*가 춘계와 하계에 저염분 수괴가 형성된 해역에서 높은 개체수가 관찰된 것은 규조류와 같이 운동성이 없는 작은 사이즈의 먹이생물이 대발생하여 야광충 증식에 보다 더 큰 영향을 미친 것으로 사료된다.

야광충 *N. scintillans*는 세포내 다량의 암모니아를 함유하고 있어, 대발생이후 사멸하는 과정에서 질소기원의 영양염을 수주내 방출하여 다른 식물플랑크톤의 성장에 도움을 주는 등 생태학적으로 중요한 역할을 하는 생물군이다(Okaichi and Nishio 1976; Montani *et al.* 1998; Tada *et al.* 2000; Rodríguez *et al.* 2005; 백 등 2008). 백 등(2008)에 의하면, Sagami Bay에서 3~4월 춘계 규조류의 대증식후, 4~5월에 *N. scintillans*의 적조현상이 빈번하게 관찰되었고, 유광충 상부의 수주(water column) 내 낮은 영양염과 더불어 야광충의 포식압으로 규조류의 증식이 둔화될 때 대발생한 야광충 또한 먹이생물의

부족으로 사멸하게 된다. 또한, 사멸과정에 발생한 N기원의 영양염은 수주내 N:P비를 높여 와편모조류 *Ceratium furca*와 *Ceratium fusus*와 같은 *Ceratium* 속의 증식에 중요한 역할을 한다고 보고하였다. 본 연구기간 동안 N기원 영양염과 *N. scintillans* 개체수와는 상관성이 관찰되지 않았고, 각 정점에서 높은 밀도의 야광충 개체수가 관찰된 정점에서조차 N기원의 영양염농도가 다른 정점보다 낮게 관찰되었다. 하지만, 진해만 장목(한국해양연구원 남해연구소 Pier; 평균수심 8.5 m)에서 수행한 주간 조사의 결과에 의하면(장 등 2010; 백 비공개 자료), 5~7월에 *N. scintillans*의 적조가 빈번하게 발생하고, 그 후 *Ceratium* 속의 대증식이 관찰되는 경향을 뚜렷하게 관찰하였다. 따라서, 추후 우리나라 해역에서 매일 조사를 통한 *N. scintillans*의 영양염 재생과 재생된 영양염을 효율적으로 사용하는 *Ceratium* 속과 같은 와편모조류의 증식특성을 보다 상세하게 연구할 필요성이 있다.

적 요

야광충 *Noctiluca scintillans*의 시공간적 변동과 생태학적 특성을 이해하기 위해서 그들의 개체수 밀도와 환경인자를 광양만 20개 정점과 진해만 23개 정점에서 2010년 춘계, 하계, 추계, 동계의 계절 조사를 수행하였다. 야광충 *N. scintillans*는 광양만과 진해만에서 15~27°C 수온 범위의 춘계와 하계에 높은 밀도가 유지된 반면, 동계와 추계는 그들의 개체수가 감소하였다. 두 해역에서 야광충의 개체수는 수온과 유의한 상관관계가 성립되었고, 이는 수온 증가와 더불어 *N. scintillans*의 증식이 활발해 진다는 것을 의미한다. 특히, 두 해역에서 4계절 모두 야광충의 출현은 확인하였으나, 저온(<4°C)과 저염(<12 psu)에서 그들 개체를 관찰할 수 없었다. 먹이생물의 지표가 되는 Chl.a 농도와 야광충의 개체수는 유의한 상관관계를 확인할 수 없었으나, 두 해역에서 Chl.a 농도가 현저하게 높았던 춘계와 하계에 야광충 개체수밀도가 높게 나타났다. 결과적으로 식물플랑크톤의 현존량은 야광충 *N. scintillans*의 개체수 증감을 제어하는 중요한 인자로 판단되었다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 연구과제 “남해특별관리해역의 관리를 위한 해양생태계 건강성 지수 개발(PE98582)과 복서태평양이 한반도 주변해(대한해협)에 미치는 영

항 연구(PE98563)”의 지원으로 수행되었습니다. 현장조사에 도움을 주신 현봉길, 이은선 연구원님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

참 고 문 헌

- 강정훈. 2010. 잠재적 위해종인 야광충의 항만 분포 특성과 수용능력. *Ocean Polar Res.* 32:449-462.
- 강정훈, 장민철, 이우진, 장풍국, 이재도, 윤미란, 신경순, 장만. 2005. On the relationships of *Noctiluca scintillans* with hydrological features and plankton characteristics in the marine station of the South Sea, Korea. 2005년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집. 281pp.
- 백승호, 시모데 신지, 한명수, 키쿠치 토모히코. 2008. 춘계와 하계의 영양염 농도와 그 구성비가 식물플랑크톤의 군집구조에 미치는 영향평가. *Algae* 23:277-288.
- 유정규, 윤석현, 최중기. 2006. 인천 연안에서 와편모류 *Noctiluca scintillans*의 시간적 변동과 생태학적 특성. *환경생물.* 24:372-379.
- 장민철, 신경순, 장풍국, 이우진. 2010. 여름철 장목만의 환경요인과 중형동물플랑크톤 단주기 변동과의 상관성. *Ocean and Polar Res.* 32:41-52.
- Baek SH, S Shimode and T Kikuchi. 2007. Reproductive ecology of the dominant dinoflagellate, *Ceratium fusus* in coastal area of Sagami Bay, Japan. *J. Oceanogr.* 63:35-45.
- 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.
- Buskey EJ. 1995. Growth and bioluminescence of *Noctiluca scintillans* on varying algal diets. *J. Plankton Res.* 17:29-40.
- Dela-Cruz J, P Ajani, HJ Middleton and MI Suthers. 2003. Population growth and transport of the red tide dinoflagellate *Noctiluca scintillans* in the coastal water off Sydney, Australia, using cell diameter as a tracer. *Limnol. Oceanogr.* 48:656-674.
- 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 Jpn. Soc. Sci. Fish.* 22:82-89.
- Hallegraeff GM. 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia* 32:79-99.
- Hansen PJ, L Miranda and R Azanza. 2004. Green *Noctiluca scintillans*: a dinoflagellate with its own greenhouse. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 275:79-87.
- Hung 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.
- 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 polykrioides* 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 Jan. Soc. Fish. Oceanogr.* 32:56-67 (in Japanese).
- Lee DK. 2008. *Cochlodinium polykrioides* blooms and ecological conditions in the South Sea of Korea. *Harmful Algae* 7:318-323.
- Lee YS and SY Lee. 2006. Factors affecting outbreaks of *Cochlodinium polykrioides* blooms in coastal areas of Korea. *Mar. Pollution Bull.* 52:626-634.
- 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.
- Okaichi T and S Nishio. 1976. Identification of ammonia as the toxic principle of red tide of *Noctiluca scintillans*. *Bull. Plankton Soc. Japan* 23:75-80.
- 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.
- Rodríguez RA, JL Ochoa and MU Alcocer. 2005. Grazing of heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans* (Macartney) Kofoid on *Gymnodinium catenatum* Graham. *Microbiol.* 47:6-10.
- Sekiguchi H and T Kato. 1976. Influence of *Noctiluca*'s predation on the *Acartia* population in Ise Bay, Central Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan* 32:195-198.
- 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.
- Uhlig 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.
- Yamaguchi M, S Itakura, N Nagasaki, Y Matsuyama, T Uchida and I Imai. 1997. Effects of temperature and salinity on the growth of the red tide flagellate *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae) and *Chattonella verruculosa* (Raphidophyceae). *J. Plankton Res.* 19:1167-1174.
- Zingone A and HO Enevoldsen. 2000. The diversity of harmful algal blooms: a challenge for science and management. *Ocean Coast Manage.* 43:725-748.

Manuscript Received: March 2, 2011

Revision Accepted: April 15, 2011

Responsible Editor: Hak Young