



동해 남부해역에서 봄철 식물플랑크톤 대증식과 환경요인

김현정 · 박재영 · 문창호[†]
(해양생태기술연구소 · [†]부경대학교)

Phytoplankton Spring Bloom and Environmental Factors in the Southern East Sea, Korea

Hyun-Jung KIM · Jae Yeong PARK · Chang-Ho MOON[†]
(Marine Eco-Technology Institute · [†]Pukyong National University)

Abstract

The phytoplankton distribution and environmental factors were studied in the southern East Sea from the year of 2008 to 2012. Spring bloom occurred in 2009, 2011 and 2012 and the dominant species was *Leptocylindrus danicus* during the bloom periods in the study area. Its abundance had a significant correlations positively with temperature, while negatively with pH, suspended solids and phosphate. It was also found that these was a significant difference in suspended solids and pH between non-bloom and bloom conditions as a result of *t*-test. It implies that low concentration of suspended solids and decrease of pH may influence on the *L. danicus* bloom in the study area.

Key words : Phytoplankton, *Leptocylindrus danicus*, Spring bloom, pH

I. 서론

중심 규조류(Centric diatom)인 *Leptocylindrus danicus*는 북극을 제외한 전 세계 해양에 분포하며, 연안에서는 흔히 대증식을 일으키는 주요 종으로 보고되고 있다(Nanjappa et al., 2013). 스페인 Galicia 해안에서는 영양염이 풍부한 대륙붕수의 유입과 수괴의 성층이 시작되는 9월에 빠르게 증식하기 때문에 성층화 지시자로서 활용되며(Bode et al., 2005; Bárcena et al., 2001), 우리나라 연안에서는 동해 남부 연안(Shim et al., 1995; Yeo & Huh, 1999; Kim et al., 2014)과 남해 연안(Lee et al., 2005; Park et al., 2012)에서 우점하여

출현하는 것으로 보고되었고, 동해 연안에서는 식물플랑크톤 봄철 대증식의 원인종으로도 보고되었다(Shim et al., 2015; Yoon, 2016).

식물플랑크톤은 수온, 염분 등과 같은 물리적 요인을 비롯하여 영양염 및 미량원소와 같은 화학적 요인 그리고 공생 및 포식압력과 같은 생물학적 요인의 영향을 받아 대증식할 수 있다. 실제로 수온의 상승(Lee & Han, 2007), 영양염 농도 증가(Lee et al., 2011) 그리고 1차 소비자인 동물플랑크톤의 섭식압력 감소(Kim et al., 1992)에 따라 식물플랑크톤이 대증식하는 사례가 보고되었다. 특히 우리나라와 같은 온대해역 연안에서는 수온 상승 및 광량 증가가 두드러지고, 수층의

[†] Corresponding author : 051-629-6573, chmoon@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2016년)에 의해 연구되었음.

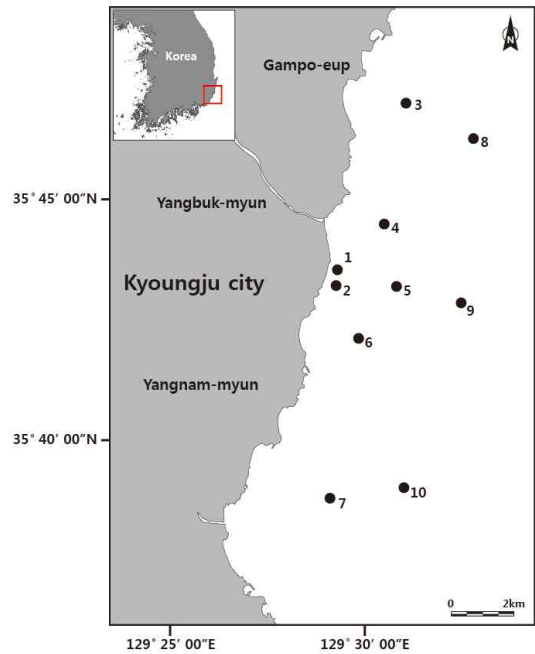
혼합에 의해 풍부한 영양염이 유광층으로 공급되는 봄철에 식물플랑크톤 대증식이 주로 발생하는 것으로 알려져 있다(Carstensen et al., 2004). 하지만, 우리나라 남해 연안과 같은 내만에서는 지속적인 연안 오염 및 부영양화에 따라 연중 영양염 농도가 높아지고, 지구온난화에 따른 고수온 지속 일수가 길어지면서 빛 투과 효율이 증가하는 여름철에도 식물플랑크톤 대증식이 발생하고 있어 식물플랑크톤 대증식은 해양환경 특성에 따라 불규칙한 경향성을 보이기도 한다(Yoon, 2000; Yoo et al., 2007).

따라서 본 연구에서는 동해 연안에서 빈번하게 발생하는 봄철 *L. danicus*의 대증식과 환경요인을 조사하여 봄철 대증식에 미치는 요인과의 관계를 살펴보았다.

II. 조사 방법

연구해역이 위치한 동해 남부해역은 연안을 따라 남쪽으로 흐르는 북한한류와 대한해협을 서수도를 통과하여 북쪽으로 흐르는 동한난류가 만나는 곳으로 계절에 따라 두 해류가 우세 정도에 차이를 보이며 영향을 미치고 있다. 본 연구에서는 연안해역에서의 수심과 남북방향 흐름의 해류를 고려하여 10개의 조사정점을 설정하였다. 조사해역 인근에 위치한 원자력발전소 시설로 인해 수질환경에 영향을 미칠 수 있는 정점으로 1과 2를 설정하였고, 정점 3~10은 수심과 해류 방향을 고려하여 설정하였다(정점 3~7: 20 m 내외, 정점 8~10: 50 m 내외) ([Fig. 1], <Table 1>). 현장조사는 2008년부터 2012년까지 총 5년간 매년 5월에 실시하였으며, 각 정점의 표층과 저층에서 van Dorn 채수기를 이용하여 해수 2 L를 채수하였다. 다기능수질측정기(YSI-3300, USA)를 이용하여 현장에서 수온, 염분, 수소이온농도(pH)와 용존산소(DO)를 측정하였다. 부유물질(SS)과 영양염(암모니아-질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 아질산-질소($\text{NO}_2^-\text{-N}$), 질산-질

소($\text{NO}_3^-\text{-N}$), 인산-인($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 및 규산-규소($\text{SiO}_2\text{-Si}$) 농도 측정을 위한 시료는 냉장상태로 실험실로 이동시킨 후 해양환경공정시험기준(2013)에 따라 분석하였으며 본 연구에서는 암모니아-, 아질산-, 질산-질소계 영양염들의 합을 용존무기질소(DIN)로 나타냈다.



[Fig. 1] Study area of the southern East Sea, Korea. Circles represent the sampling stations.

식물플랑크톤 관찰을 위한 시료는 해수 500 mL를 Lugol's solution으로 고정하였으며, 알루미늄호일로 감싸 빛을 차단하여 실험실로 운반하였다. 실험실에서 48시간 이상 침전과정을 거친 후 최종 농도 50 mL로 정량화하였으며, 그 중 1 mL를 취하여 광학현미경(CX31, Olympus, Japan)하에서 *L. danicus*를 동정 및 계수하였다.

연구해역에서 *L. danicus*의 봄철 대증식에 영향을 미친 환경적 요인을 살펴보기 위해 SPSS (ver. 17.0)를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 분석에 앞서 잔차(Residuals)의 분포를 파악하여 극단치를

제거하였으며, 정규분포를 따르지 않는 자료 집단에 대한 자료의 전처리 과정인 $\log_{10}(X+1)$ 으로의 자료변환(Data transformation) 과정을 거쳤다. *L. danicus*의 현존량과 환경요인 간 상관분석(Pearson's correlation)을 실시한 후, 유의한 상관관계가 확인된 요인에 한하여 대증식 유무에 영향을 미친 환경적 차이를 *t*-test로 알아보았다.

<Table 1> The latitude and longitude at each station sampled in the southern East Sea

Station	Latitude (N)	Longitude (E)
1	35°43' 30"	129°29' 34"
2	35°43' 08"	129°29' 31"
3	35°46' 48"	129°31' 08"
4	35°44' 16"	129°30' 36"
5	35°43' 01"	129°30' 54"
6	35°41' 56"	129°29' 56"
7	35°38' 38"	129°29' 13"
8	35°46' 04"	129°32' 49"
9	35°42' 39"	129°32' 31"
10	35°39' 43"	129°31' 19"

III. 결과 및 고찰

연구기간 동안 수온은 10.45~15.65°C (평균 13.21±2.98°C), 염분은 33.81~34.91 psu (평균 34.25±0.44 psu), pH는 8.05~8.17 (평균 8.10±0.09), DO는 7.26~8.95 mg/L (평균 8.24±0.76 mg/L), SS는 5.53~8.65 mg/L (평균 7.29±1.78 mg/L)로 변동하였다([Fig. 2]). 영양염류들을 살펴보면 DIN은 1.95~2.51 μM (평균 2.14±0.52 μM), P는 0.12~0.16 μM (평균 0.14±0.04 μM), Si는 4.68~6.21 μM (평균 5.44±1.69 μM)이었다([Fig. 2]). 매년 동일한 시기에 현장조사가 수행됨으로써 환경요인들의 변동 폭은 비교적 적었으며, 이들 분포 범위는 동

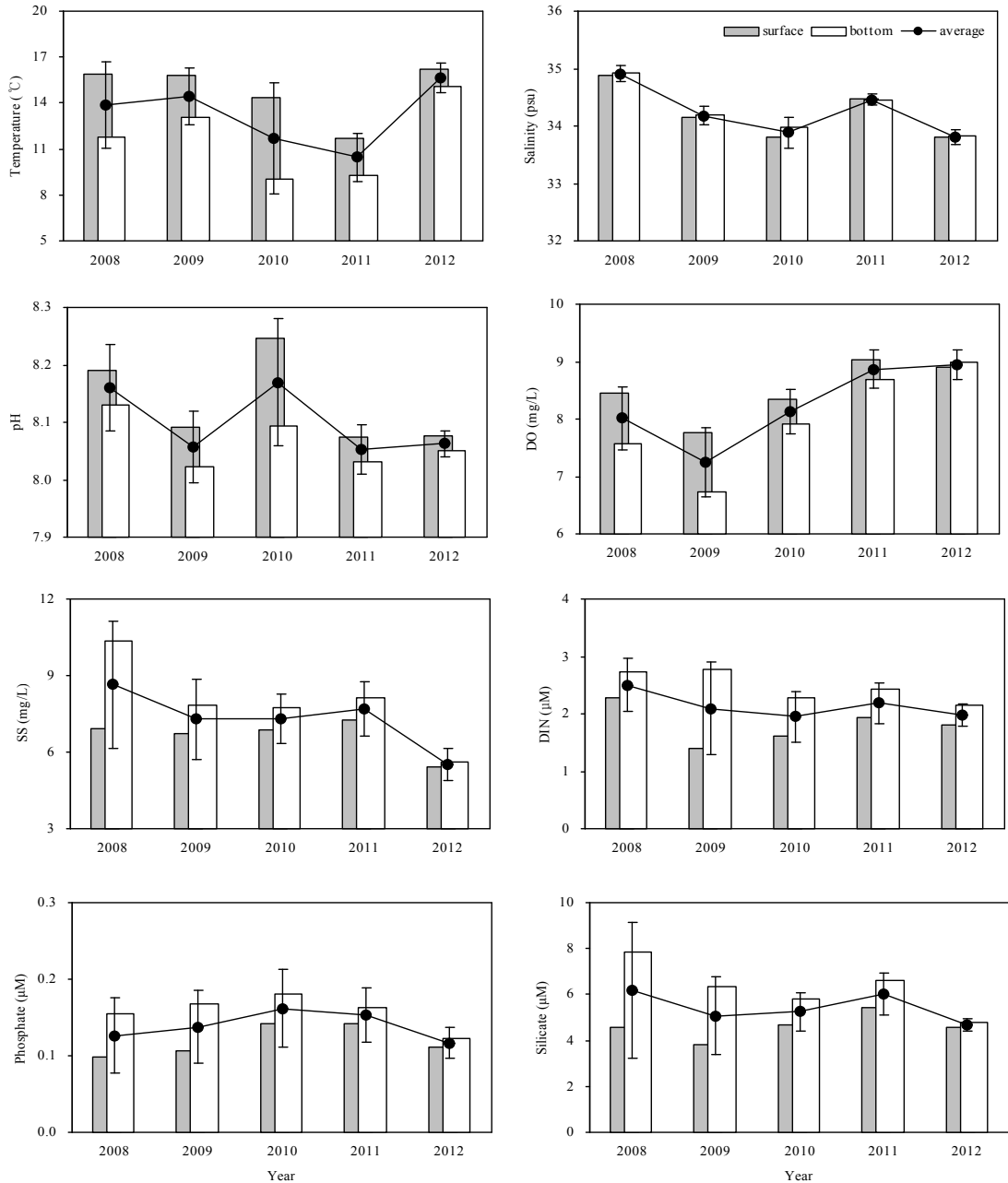
해 연안에서의 기존 연구결과 농도와 유사하게 나타나고 있었다(Kim et al., 2014).

연구해역에서 2008년과 2010년 봄에는 *L. danicus*를 포함하는 식물플랑크톤의 대증식이 발생하지 않았던 반면, 2009년, 2011년 및 2012년 봄에는 *L. danicus* 현존량이 1,000 cells/mL 이상이 관찰되어 대증식이 확인되었다([Fig. 3]). *L. danicus*는 본 연구해역 뿐만 아니라 우리나라 남해와 동해에 봄철 주요 우점종으로 보고되어 있으며(Kim et al., 2016), 쿠로시오 해류가 영향을 미치는 일본의 용승지역에서는 *Nitzschia pungens*와 함께 우점 출현하였다(Furuya et al., 1986). 특히 진해만에서 *L. danicus*는 담수의 유입이 적어 영양염 농도가 낮고 염분 농도가 높은 환경에서 우점 출현하였고(Park et al., 2012), 남중국해 북쪽에 위치한 Dapeng 만에서의 *L. danicus* 대증식은 DIP와 관련성이 있고 그 외 DIN, 수온, 염분 및 활성 Si(OH)₄와는 유의한 관계가 없었다(Chen, 1993).

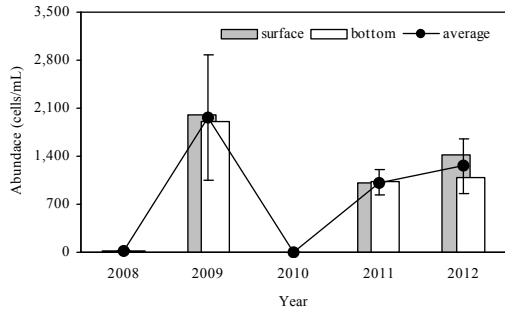
일반적으로 이 종의 성장 최적 염분은 31.8 psu이고 협염성으로 알려져 있으나(Werner, 1977), 진해만과 통영 바다목장 해역에서 34 psu 이상 조건에서도 우점 출현한 바 있다(Lee et al., 2005; Park et al., 2012), 본 연구에서도 염분의 농도에 상관없이 대증식이 일어난 것으로 나타나($p > 0.05$, <Table 2>), 염분의 영향은 미미한 것으로 생각된다. 또한 대증식이 일어난 시기의 평균 수온은 13.51°C로 *L. danicus*의 성장 최적 수온(15~20°C; Vertity, 1982) 보다 다소 낮았으며, 저층의 *L. danicus* 현존량과 수온이 양의 상관관계($p < 0.01$, <Table 2>)를 보이는 것으로 나타나 향후 봄철에 적절한 수온 증가, 즉 성장 최적 수온에 해당하는 수온 증가는 *L. danicus*의 대증식에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다. 한편 식물플랑크톤은 CO₂를 소비하며 증식하기 때문에 해수의 pH는 상승하는 것이 일반적이다(David, 1994). 기존 연구에서도 식물플랑크톤 개체수가 증가하면서 pH가 증가한다고 보고되었으나(Shim et al.,

2013), 본 연구에서는 *L. danicus*의 현존량과 pH가 유의한 음의 상관관계를 보이는 것으로 나타

나($p < 0.01$, <Table 2>), 기존 연구와는 상반되는 결과였다.



[Fig. 2] Temporal fluctuation of environmental factors during every May from 2008 to 2012. The black circles and bars indicate average and standard deviations between the surface and bottom waters.



[Fig. 3] Temporal fluctuation of *Leptocylindrus danicus* abundance during every May from 2008 to 2012. The black circles and bars indicate average and standard deviations between the surface and bottom waters.

이와 같이 연구해역에서 *L. danicus* 현존량은 수온(+), pH, SS 및 P (-)와 상관관계가 있는 것으로 밝혀졌으나(<Table 2>), 어떠한 특정 환경요인의 차이로 인해 *L. danicus*의 연도별 대증식 유무가 결정되는지를 파악할 수 없었다. 따라서 연구기간 동안 대증식이 발생하지 않은 시기 (Group A, *L. danicus* 현존량 <10 cells/mL: 2008년 및 2010년)와 대증식이 발생한 시기(Group B, *L. danicus* 현존량 >1,000 cells/mL: 2009년, 2011년 및 2012년)를 구분하여 *L. danicus*의 현존량에 영향을 미치고 있는 네 가지 환경요인(수온, pH, SS 및 P)에 한하여 두 그룹 간 독립표본 *t*-test를 실시하였다. 그 결과 두 그룹 간 pH (표층, 저층 및 전체(표층+저층))와 SS (저층 및 전체(표층+저층))가 유의한 차이를 보여(<Table 3>, [Fig. 4]), 연구해역에서의 봄철 *L. danicus* 대증식 유무는 pH와 SS의 차이로 결정된 것으로 나타났다. SS는 빛의 투과를 감소시킴으로써 수중에 잠겨있는 부착식물(저서미세조류)이나 해조류의 광합성을 제한할 수 있으나, 표층에서 부유하는 식물플랑크톤에게는 이러한 메카니즘이 크게 중요하지 않다(Bilotta & Brazier, 2008). 본 연구에서도 표층에서 *L. danicus*의 현존량과 SS 사이에

는 유의한 상관관계를 보이지 않았으나, 저층에서 음의 상관관계($p < 0.05$, <Table 2>)를 보이고, Group A (9.06 ± 2.18 mg/L)와 Group B (7.20 ± 1.59 mg/L) 간 유의한 농도 차이를 보였다($p < 0.001$, <Table 3>). 따라서 저층으로 빛이 충분히 투과됨으로써 *L. danicus*의 대증식에 영향을 준 것으로 판단된다.

<Table 2> Correlation coefficients (*r*) by Pearson correlation analysis between *Leptocylindrus danicus* abundance and environmental factors during every May from 2008 to 2012

	<i>Leptocylindrus danicus</i> abundance		
	Surface (n=49)	Bottom (n=46)	Total (n=97)
Temp.	-	0.377**	-
Sal.	-	-	-
pH	-0.774**	-0.511**	-0.702**
DO	-	-	-
SS	-	-0.316*	-0.215*
DIN	-	-	-
Phosphate	-	-0.296*	-
Silicate	-	-	-

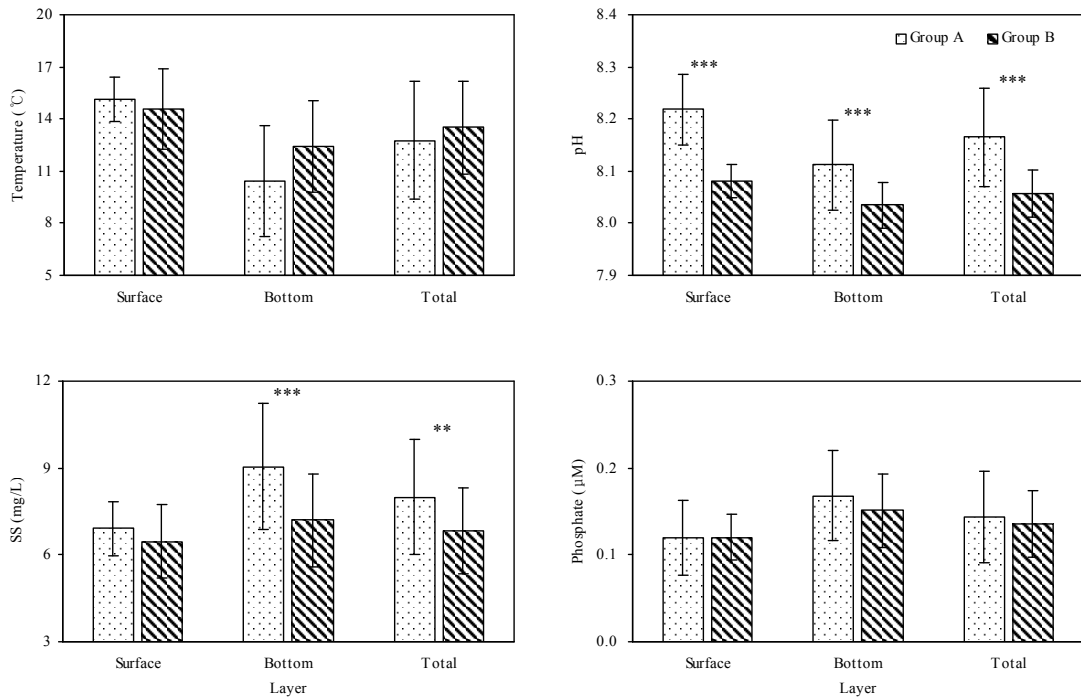
- not significant; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

한편 봄철 대증식에 영향을 미친 또 다른 환경요인은 pH인 것으로 유추되었다(<Table 3>, [Fig. 4]). 인위적으로 생성되어 대기로 배출된 CO₂는 해양으로 흡수되어 해수 중 pH를 낮춤으로써 해양산성화를 유발할 수 있다(Doney et al., 2009). 따라서 최근 해양산성화가 해양생태계에 미치는 영향을 파악하기 위해 CO₂ 농도 증가(또는 pH 감소)가 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향에 대한 다양한 실험이 이루어지고 있다. CO₂ 농도 변화에 의한 식물플랑크톤 군집(종)의 반응은 영양염 이용률과 탄소분자 형태별 이용률에

<Table 3> Average±standard deviation and the result of *t*-test on environmental factors which have a significant correlation with the *Leptocylindrus danicus* abundance (Group A: non-bloom conditions, Group B: bloom conditions)

	Variables	Average±S.D.		<i>t</i> -value
		Group A	Group B	
Surface (n=49)	pH	8.22±0.07	8.08±0.03	8.105***
Bottom (n=46)	Temp. (°C)	10.40±3.19	12.45±2.65	-1.992
	pH	8.11±0.09	8.03±0.04	4.150***
	SS (mg/L)	9.06±2.18	7.20±1.59	4.031***
	Phosphate (µM)	0.17±0.05	0.15±0.04	1.491
Total (n=97)	pH	8.16±0.09	8.06±0.04	8.578***
	SS (mg/L)	7.98±1.98	6.83±1.47	3.338**

** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$



[Fig. 4] Comparison of average of environmental factors between non-bloom and bloom conditions. The bar indicates standard deviation. (Group A: non-bloom conditions, Group B: bloom conditions, ** means $p < 0.01$ and *** means $p < 0.001$ obtained by the *t*-test analysis.)

따라 나타난다. CO₂ 농도가 증가하면 *Heterosigma akashiwo*, *Cerataulina pelagica*, *L. danicus* 및 규조류 군집의 성장이 촉진되거나(긍정적 영향), *Phaeocystis* sp. 등 일부 분류군의 성장은 둔화되며(부정적 영향), 또는 *Chaetoceros debilis*, *Prorocentrum minimum* 등 아무 영향을 미치지 않거나, 동일 종(예. *Skeletonema costatum* 및 *Thalassiosira nordenskiöldii*)이라도 반응 결과가 다르게 나타나는 경우가 있었다(Tortell et al., 2002; Fu et al., 2008; Riebesell & Tortell, 2011; Kim, 2013; Hyun et al., 2014). 식물플랑크톤은 해수 중 무기탄소 형태(pH 8.2일 때 CO₂ <1%, HCO₃⁻ ≃90%, CO₃²⁻ ≃9%, Riebesell, 2004)에 따라 이들의 흡수 및 이용률이 다르고, CCM (Carbon concentrating mechanism)을 통해 HCO₃⁻를 CO₂로 전환하여 CO₂가 제한된 환경을 극복할 수 있다(Badger & Price, 1994; Raven & Falkowski, 1999). 따라서 CCM이 부족하여 CO₂ 흡수에만 의존하거나, 효율적인 CCM을 가지고 있어 HCO₃⁻를 우점적으로 사용하는 경우, CO₂와 HCO₃⁻를 모두 흡수하는 경우(Nimer et al., 1997; Rost et al., 2006; Fu et al., 2008) 등 CO₂ 농도 변화에 대한 민감도 차이가 결국 식물플랑크톤 군집 내 경쟁 관계나 종조성 변화를 야기시킬 수 있다(Burkhardt et al., 2001; Rost et al., 2008).

하지만 본 연구해역에서는 pH가 낮을 때 대증식을 일으킨 *L. danicus*에 대한 영양염 이용률과 무기탄소 형태에 따른 흡수 정보가 알려진 바가 없기 때문에 pH 감소에 따른 CO₂ 농도 증가 시 이 종의 반응기작 원인을 명확히 밝히기에는 어려움이 있었다. 그러나 Kim (2013)의 실험에서 *L. danicus*의 현존량은 수온보다는 pH에 영향을 받으며 pH와 유의한 음(-)의 상관관계가 있음을 밝혀 본 연구결과와 일치하였다. 따라서 *L. danicus*의 현존량과 pH 사이에는 연관성이 있는 것으로 판단된다.

향후 더 정확한 반응기작을 밝히기 위해서는 *L. danicus*를 대상으로 현장조사를 통한 모니터

링 뿐만 아니라 pH 감소(또는 CO₂ 증가)에 따른 *L. danicus* 종의 반응 실험이 병행되어야 할 것으로 생각된다.

IV. 결론

본 연구에서는 동해 남부에 위치한 경주시 연안에서 *Leptocylindrus danicus*의 현존량과 봄철 대증식 유무에 미치는 해양 환경적 요인에 대해 살펴보았다. *L. danicus*의 현존량은 수온, pH, SS 및 P와 유의한 상관관계가 있었으며, *t*-test 결과 대증식 유무에 차이를 보인 환경요인은 pH와 SS인 것으로 파악되었다. 특히, 저층에서 SS의 농도가 낮을 경우, 저층으로의 충분한 빛의 투과가 가능하며, 이에 따라 *L. danicus*의 성장에 긍정적인 영향을 미쳐 대증식할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 pH가 낮을 때 *L. danicus*가 대증식하여 향후 대기 중 CO₂ 농도 증가로부터 야기되는 해수 중의 pH 감소는 *L. danicus*의 성장을 촉진시킬 수 있음을 시사하였다. 이러한 낮은 pH에 대한 *L. danicus* 반응에 대한 메커니즘을 더 정확하게 이해하기 위해서는 탄소형태에 따른 *L. danicus* 흡수 및 이용률에 대한 추가 연구가 필요하다.

References

- Badger, M. R. & Price, G. D.(1994). The role of carbonic anhydrase in photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 45, 369~392.
- Bárceña, M. A. · Cacho, I. · Abrantes, F. · Sierro, F. J. · Grimalt, J. & Flores, J. A.(2001). Paleoproductivity variations related to climatic conditions in the Alboran Sea (Western Mediterranean) during the last Glacial-Interglacial transition: the diatom record. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 167(3~4), 337~357.
- Bilotta, G. S. & Brazier, R. E.(2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Res.*, 42, 2849~2861.

- Bode, A. · Álvarez-Ossorio, M. T. · González, N. · Lorenzo, J. · Rodríguez, C. · Varela, M. & Varela, M. M.(2005). Seasonal variability of plankton blooms in the Ria de Ferrol (NW Spain): II. Plankton abundance, composition and biomass. *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 63(1~2), 285~300.
- Burkhardt, S. · Amoroso, G. · Riebesell, U. & Sültemeyer, D.(2001). CO₂ and HCO₃⁻ uptake in marine diatoms acclimated to different CO₂ concentrations. *Limnol. Oceanogr.*, 46(6), 1378~1391.
- Carstensen, J. · Conley, D. J. & Henriksen, P.(2004). Frequency, composition and causes of summer phytoplankton blooms in shallow coastal ecosystem, the Kattegat. *Limnol. Oceanogr.*, 49(1), 191~201.
- Chen, W.(1993). Population ecology of *Leptocylindrus danicus* in Dapeng bay, north of South China Sea. *Mar. Sci. Bull.*, 1993(2), 39~45.
- David, H. M.(1994). *Marine Life and the Sea* (Wadsworth Biology Series). Wadsworth Publishing Company, 512pp.
- Doney, S. C. · Fabry, V. J. · Feely, R. A. & Kleypas, J. A.(2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 1, 169~192.
- Fu, F. X. · Zhang, Y. · Warner, M. E. · Feng, Y. · Sun, J. & Hutchins, D. A.(2008). A comparison of future increased CO₂ and temperature effects on sympatric *Heterosigma akashiwo* and *Prorocentrum minimum*. *Harmful Algae*, 7(1), 76~90.
- Furuya, K. · Takahashi, M. & Nemato, T.(1986). Summer phytoplankton community structure and growth in a regional upwelling area off Hachijo Island, Japan. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 96(1), 43~55.
- Hyun, Bonggil · Choi, Keun-Hyung · Jang, Pung-Guk · Jang, Min-Chul · Lee, Woo-Jin · Moon, Chang-Ho & Shin, Kyoungsoon(2014). Effects of increased CO₂ and temperature on the growth of four diatom species (*Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros didymus*, *Skeletonema costatum* and *Thalassiosira nordenskiöldii*) in laboratory experiments. *J. Env. Sci. Intern.*, 23(6), 1003~1212.
- Kim, A-Ram · Yoon, Seok-Hyun · Chung, Mi-Hee · Yoon, Sang-Chol & Moon, Chang-Ho(2014). The influences of coastal upwelling on phytoplankton community in the southern part of East Sea, Korea. *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, 19(4), 287~301.
- Kim, Hyun-Jung · Park, Jae Yeong · Son, Min Ho & Moon, Chang-Ho(2016). Long-term variations of phytoplankton community in coastal waters of Kyungju City area. *J. Kor. Soc. Fish. Mar. Edu.*, 28(5), 1417~1434.
- Kim, SeulMin(2013). Effects of CO₂ and Temperature Elevation on Carbon Uptake and Organic Matter Production by a Natural Assembly of Coastal Phytoplankton. Master's Thesis, Pohang University of Science and Technology, Pohang, 55pp.
- Kim, Woong-Seo · Chang, Man & Shim, Jae Hyung (1992). Multitrophic interactions as a trigger of the *Gyrodinium aureolum* bloom in Reeves Bay, New York. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 27(4), 268~276.
- Lee, Jin Hwan · Jung, Seung Won & Kim, Jong-Man(2005). Effects of environmental factors on phytoplankton communities in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters, Korea. *Ocean Polar Res.*, 27(1), 15~24.
- Lee, Juyun & Han, Myung-Soo(2007). Change of blooming pattern and population dynamics of phytoplankton in Masan Bay, Korea. *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, 12(3), 147~158.
- Lee, Yeon-Jung · Min, Jun-Oh · Shin, Yongsik · Kim, Sung-Hwan & Shin, Kyung-Hoon(2011). Temporal and spatial variations of primary productivity in estuary of Youngsan River and Mokpo coastal areas. *Korean J. Limnol.*, 44(4), 327~336.
- Nanjappa, D. · Kooistra, W. H. C. F. & Zingone, A.(2013). A reappraisal of the genus *Leptocylindrus* (Bacillariophyta), with the addition of three species and the erection of *Tenuicylindrus* gen. nov. *J. Phycol.*, 49(5), 917~936.
- Nimer, N. D. · Iglesias-Rodriguez, M. D. & Merrett, M. J.(1997). Bicarbonate utilization by marine phytoplankton species. *J. Phycol.*, 33, 625~631.
- Park, Kyung-Woo · Suh, Young-Sang & Lim, Weol-Ae(2012). Seasonal changes in phytoplankton composition in Jinhae Bay, 2011. *J. Korean Soc.*

- Mar. Environ. Saf., 18(6), 520~529.
- Raven, J. A. & Falkowski, P. G.(1999). Oceanic sinks atmospheric CO₂. Plant, Cell Environ., 22, 741~755.
- Riebesell, U. & Tortell, P. D.(2011). Effects of ocean acidification on pelagic organisms and ecosystems. In: Gattuso, J. P. & Hansson, L. (eds.), Ocean Acidification. Oxford University Press, Oxford, pp. 99~121.
- Riebesell, U.(2004). Effects of CO₂ enrichment on marine phytoplankton. J. Oceanogr., 60, 719~729.
- Rost, B. · Richter, K. U. · Riebesell, U. & Hansen, P. J.(2006). Inorganic carbon acquisition in red tide dinoflagellates. Plant, Cell Environ., 29, 810~822.
- Rost, B. · Zondervan, I. & Wolf-Gladrow, D.(2008). Sensitivity of phytoplankton to future change in ocean carbonate chemistry: current knowledge, contradictions and research directions. Mar. Ecol. Prog. Ser., 373, 227~237.
- Shim, Jae Hyung · Yeo, Hwan Goo & Park, Jong Gyu(1995). Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea II. The structure of phytoplankton community. J. Korean Soc. Oceanogr., 30(3), 163~169.
- Shim, Jeong-Min · Kwon, Ki-Young · Jeong, Hee-Don g · Choi, Yong-Kyu & Kim, Sang-Woo(2013). Spatial and temporal variability of phytoplankton in relation to environmental factors in Youngil Bay. J. Env. Sci. Intern., 22(12), 1683~1690.
- Shim, Jeong-Min · Kwon, Ki-Young · Kim, Sang-Woo & Yoon, Byong-Seon(2015). Seasonal change of phytoplankton dominant species based on water mass in the coastal areas of the East Sea. J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 21(5), 474~483.
- Tortell, P. D. · DiTullio, G. R. · Sigman, D. M. & Morel, F. M. M.(2002). CO₂ effects on taxonomic composition and nutrient utilization in an Equatorial Pacific phytoplankton assemblage. Mar. Ecol. Prog. Ser., 236, 37~43.
- Verity, P. G.(1982). Effects of temperature, irradiance, and daylength on the marine diatom *Leptocylindrus danicus* Cleve IV. Growth. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 60(2~3), 209~222.
- Werner, D.(1977). The Biology of Diatoms. University of California Press, Los Angeles, 469pp.
- Yeo, Hwan-Goo & Huh, Sung-Hoi(1999). Temporal and spatial variations of phytoplankton communities in the pelagic environment of Kori, Korea. Korean J. Environ. Biol., 17(1), 71~77.
- Yoo, Man Ho · Song, Tae Yoon · Kim, Eun Soo & Choi, Joong Ki(2007). The characteristics on the spatial and temporal distribution of phytoplankton in the western Jinhae Bay, Korea. The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr., 12(4), 305~314.
- Yoon, Yang Ho(2000). A characteristics of the spatio-temporal distribution of phytoplankton community in northwestern Kamak Bay, southern Korea. Bull. Fish. Sci. Inst., Yosu Nat'l Univ., 9, 34~47.
- Yoon, Yang Ho(2016). Bio-environmental characteristics of the Uljin Marine Ranching Area(UMRA), East Sea of Korea. 1. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 19(1), 37~46.

• Received : 06 September, 2017

• Revised : 18 November, 2017

• Accepted : 23 November, 2017