

2013년 하계 자란만 서부 연안의 *Cochlodinium* 적조 미발생 원인 : 영양염 자료를 중심으로

권형규* · 김현정** · 양한섭** · 오석진**†

* 부경대학교 해양과학공동연구소, ** 부경대학교 해양학과

Non-Outbreak Cause of *Cochlodinium* Bloom in the Western Coast of Jaran Bay in Summer, 2013 : On the Basis of Nutrient Data

Hyeong-Kyu Kwon* · Hyun-Jung Kim** · Han-Seob Yang** · Seok-Jin Oh**†

* Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

** Department of Oceanography, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

요 약 : 2013년 하계 자란만 서부 연안에서 *Cochlodinium polykrioides* 적조의 미발생 원인을 화학적 현장관측결과와 기존에 발표된 *C. polykrioides*의 생리학적 자료를 이용하여 해석하였다. 조사기간 동안 식물플랑크톤 군집은 규조류가 우점하고 있었으며, *Cerataulina pelagica*, *Chaetoceros* spp., *Navicula* spp. 그리고 *Nitzschia* spp.가 주요 우점종으로 출현하였다. 자란만 서부 연안의 영양염 농도는 이전의 *C. polykrioides* 적조 발생 시기에 비해서 DIP 농도는 유사하였지만, DIN 농도는 낮았다. 특히, *C. polykrioides*는 자란만 서부 연안에서 우점종으로 출현하는 규조류들에 비해서 무기 영양염에 대한 반포화상수(Ks)가 낮아 이들과의 종 경쟁에서 불리한 위치에 있는 것으로 보였다. 또한 상대적으로 낮은 DIN 농도를 보인 자란만 서부 연안은 질소에 대한 의존성이 높은 *C. polykrioides*가 증식하기 위해서 불리한 환경이었다. 따라서 자란만 서부 연안의 낮은 영양염 환경하에서 무기 영양염 경쟁에 대해 불리한 위치에 있는 *C. polykrioides*는 규조류의 번무에 따라 출현이 억제된 것으로 생각된다.

핵심용어 : 자란만 서부 연안, *Cochlodinium polykrioides*, 미발생, 용존 무기 질소, 용존 무기 인

Abstract : We investigated cause of non-outbreak of *Cochlodinium polykrioides* blooms in the western coast of Jaran Bay during Summer, 2013, by combining chemical field data and physiological data of *C. polykrioides*, which had been already published. The predominant species were mainly diatoms, and dominant species was *Cerataulina pelagica*, *Chaetoceros* spp., *Navicula* spp. and *Nitzschia* spp.. In case of dissolved inorganic nutrients in the western coast of Jaran Bay, dissolved inorganic phosphorus (DIP) was similar to that in previous outbreak period of *C. polykrioides* blooms, but dissolved inorganic nitrogen (DIN) was lower. *C. polykrioides* might be disadvantageous in competition with diatom species because half-saturation constants (Ks) of *C. polykrioides* for inorganic nutrients was lower than those of diatoms. Also, the western coast of Jaran Bay, where DIN concentration is relatively low, was an unfavorable environment for growth of *C. polykrioides* characterized by nitrogen dependence. Therefore, *C. polykrioides* which have the disadvantageous position for competition of inorganic nutrient might have been suppressed by diatom blooms under environment of low nutrient in the western coast of Jaran Bay.

Key Words : Western coast of Jaran Bay, *Cochlodinium polykrioides*, Non-outbreak, Dissolved inorganic nitrogen, Dissolved inorganic phosphorus

1. 서론

식물플랑크톤 군집에 영향을 주는 환경요인은 수온, 염분, 조도, 영양염 그리고 미량금속 그리고 수괴의 안정도와

같은 물리·화학적 요인과 포식자의 포식압과 같은 생물학적 요인을 들 수 있다. 그 중에서 영양염은 식물플랑크톤의 성장은 물론 중간 경쟁과 공존 및 종 천이에 깊게 관여하며, 대발생을 유발하는 중요한 요인이 된다(Tilman et al., 1982). 연안에서는 주변 환경 요인에 의해서 영양염의 시공간적인 분포가 다르게 나타나 지역적인 특성을 보이게 된

* First Author : Kwon124@pknu.ac.kr, 051-629-6572

† Corresponding Author : sjoh1972@pknu.ac.kr, 051-629-6576

다. 특히, 영양염은 봄철과 여름철의 강우나 태풍과 같은 일시적인 사건을 통해서 유입 되고, 도시 및 공단의 인위적인 오염원으로부터 해양으로 유입된다. 이러한 영양염의 양적이고 질적인 특성들은 식물플랑크톤의 군집이나 종조성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Tilman et al., 1982; Egge and Aksnes, 1992; Escaravage et al., 1996).

영양염과 식물플랑크톤 관계에 관련된 최초의 이론은 생존에 필요한 물질이나 조건들이 충족되지 않는 성분에 따라 성장이 제한되는 Liebig's 최소량의 법칙이며, 이에 따라 종 경쟁(species competition) 및 종 천이(species succession)에 영향을 준다. Egge and Aksnes(1992)는 mesocosm 실험을 통해서 규산염의 농도가 $2 \mu\text{M}$ 이하로 감소되면, 규조류에서 편모조류로 종 천이가 발생하는 것을 관찰하였으며, Escaravage et al.(1996)도 인산염에서 규산염으로 영양염이 제한되면, 규조류에서 편모조류로 군집의 천이가 일어난다고 보고하였다. 뿐만 아니라 영양염의 구성비 역시 종조성에 영향을 미치며, $\text{DSi} : \text{DIN}$ 비의 감소에 따라 식물플랑크톤 군집이 규조류에서 편모조류로 천이된다(Humborg et al., 1997). 또한 규조류는 $\text{DSi} : \text{DIN}$ 비가 1일 때 DSi 의 제한을 받으며, 1이하의 환경이 지속되면 규조류가 성장할 수 없어 종 천이를 유발하기도 한다(Turner et al., 1998). 따라서 영양염의 절대적 농도뿐만 아니라 이들의 상대적인 비는 식물플랑크톤의 군집구조와 종 천이를 유도하는 주요 원인임을 알 수 있다.

식물플랑크톤은 영양염 환경에 따라서 종 또는 분류군 특이성의 생존전략을 가지고 있다. Sommer(1989)는 영양염 단계 및 흡수 전략을 바탕으로 2가지로 구분하여 제시하였다. 흡수한 영양염을 바로 이용하는 성장전략(growth strategy) 그리고 높은 세포 내 저장능력을 바탕으로 흡수한 영양염을 세포 내에 축적하는 저장전략(storage strategy)으로 구분하였다. 특히, 영양염에 대한 반포화상수(K_s)가 낮은 종은 성장전략에 해당되며, 세포 내 영양염 함유량이 높은 종은 저장전략에 따라 생존하게 된다. 따라서 식물플랑크톤의 영양염에 대한 생존전략의 차이는 영양염 환경에 따라 우점할 수 있는 종이 달라질 수 있는 것을 의미한다.

한편, 유해성 와편모조류 *Cochlodinium polykrikoides*는 Caribbean해에 위치하고 있는 Puerto Rico에서 처음으로 발견되었다(Margalef, 1961). 이 종에 의한 적조는 일본(Yuki and Yoshimatsu, 1989), 캐나다(Whyte et al., 2001), 인도양의 Reunion Island(Turquet et al., 1998), 호주의 Moreton Bay(Hallaegraeff, 1991)등 전 세계적으로 발생하여 수산생물에 피해를 일으키고 있다.

우리나라 연안에서 *C. polykrikoides*의 적조는 1982년 진해만에서 처음 발생한 이래 지금은 나로도 연안을 비롯하여,

군산, 완도, 가막만, 돌산, 통영, 거제, 부산, 기장, 울산, 포항, 죽변, 묵호, 강릉 등 거의 우리나라 전 연안에서 적어도 1회 이상 발생한 기록을 가지고 있을 정도로 그 발생 범위가 광역화되고 있는 추세에 있다(Lee and Choi, 2009). 더욱이 1995년에는 남해안과 동해안에서 대규모로 발생하여 764억원의 수산피해를 발생시켰으며, 매년 여름철마다 광범위하게 발생하여 막대한 경제적 손실과 해양생태계의 황폐화를 초래하고 있다(NFRDI, 1997; 2004). 특히, 지난 2013년에는 남해안과 동해안에서 *C. polykrikoides*의 적조가 형성되었으며, 이로 인해서 약 3천만 마리에 가까운 양식 어류가 폐사하였으며, 약 247억원의 경제적 손실이 발생하였다. 2013년도에 발생한 *C. polykrikoides* 적조의 특징은 역대 가장 빠른 시기(7월 17일)에 발생하였으며, 강한 일사량과 일조시간 및 폭염이 장기간 지속되었던 점이 원인으로 지적되었다(Park et al., 2013). 뿐만 아니라 예년에 비해 높은 수온 및 강한 남풍계열의 바람이 불면서 적조생물의 연안 집적이 가속화 되었으며 빠른 시간에 광역화되어 동시다발적으로 발생(전라남도~강원도)하였으며, 고밀도(약 3×10^4 cells/mL)로 발생하는 특징을 보였다. 또한 예년 적조는 외해 및 연안내측에서 발생한 반면 2013년에는 연안역에서 고밀도로 적조가 발생하였으며, 외해측에서는 미발달한 경향을 보였다(Park et al., 2013). 이처럼 남해 전역에 걸쳐서 *C. polykrikoides*의 적조가 발생함에도 불구하고 *C. polykrikoides*의 상습 출현지역인 자란만 서부 연안의 경우 유영세포가 발견되지 않았다. 따라서 본 연구는 자란만 서부 연안에서 *C. polykrikoides*의 적조 미발생 원인을 2013년 5월~8월까지의 자란만 서부 연안의 화학적 현상관측결과와 기존에 보고된 생리학적 자료를 바탕으로 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

자란만 서부 연안의 화학적 특성을 파악하기 위해서 2개 정점(Fig. 1)을 대상으로 2013년 5월부터 8월까지 월 2회(7월은 1회) 현장관측을 실시하였다. 2개의 정점(JR 1, JR 2)에 정박되어 있는 바지선위에서 표층수를 채수하였으며, 채수된 시료는 즉시 유리 섬유 여과지(GF/F filter, 47 mm, 0.7 μm pore size, Whatman)를 이용하여 식물플랑크톤 세포가 파괴되지 않는 30 mm Hg 이하의 낮은 압력 하에서 진공여과한 후 10% CuSO_4 를 첨가하여 분석 전까지 냉동보관($< -20^\circ\text{C}$)하였다. 용존 무기 영양염인 암모니아($\text{NH}_4\text{-N}$; ammonium), 아질산염($\text{NO}_2\text{-N}$; nitrite), 질산염($\text{NO}_3\text{-N}$; nitrate), 인산염($\text{PO}_4\text{-P}$; phosphate) 그리고 규산염($\text{SiO}_2\text{-Si}$; silicate)은 해양환경공정시험기준(MLTM, 2010)에 의거하여 영양염 자동 분석기(Bran+Luebbe, TRACCS 2000, Germany)를 이용하여 측정하였다. 용존 무기

영양염 중 PO₄-P는 용존 무기 인(DIP; dissolved inorganic phosphorus)로 고려하였으며, 용존 무기 질소(DIN; dissolved inorganic nitrogen)는 NH₄-N, NO₂-N 그리고 NO₃-N의 합으로 하였다. 또한 규산염은 용존 규산염(DSi; dissolved silicate)로 하였다.

식물플랑크톤 현존량 및 종조성 측정하기 위하여 표층수 1 L를 채수하여 폴리에틸렌병에 담은 후 현장에서 즉시 Lugol's solution으로 고정하였다. 고정된 시료는 광산화를 방지하기 위하여 알루미늄 호일로 병을 감싸 빛을 차단시켰다. 현미경 관찰을 위한 시료는 침전관에서 48 시간 이상 침전시킨 다음, 상등액을 제거하여 10 mL로 농축하였다. 정량 분석은 농축된 시료 1 mL를 취하여 Sedgwick-Rafter counting chamber를 사용하여 광학현미경(TE-2000, Nikon, Japan)의 100-400배에서 계수하였으며, 단위체적당 세포수를 식물플랑크톤 현존량으로 환산하였다. 식물플랑크톤의 분류 및 동정은 Chihara and Murano(1997)와 Tomas(1997) 등의 참고문헌을 이용하였다.

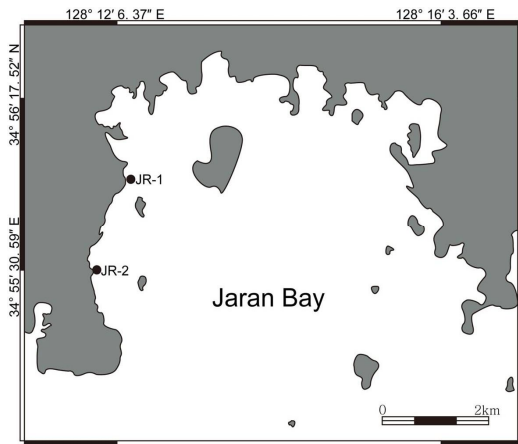


Fig. 1. Map showing the sampling stations in the western coast of Jaran Bay, Korea.

3. 결과 및 고찰

3.1 자란만 서부 연안의 화학적 및 생물학적 해양환경 특성

조사기간동안 아질산염은 JR 1에서 0.02~0.39 μM(평균 0.20±0.13 μM), JR 2에서 0.13~0.39 μM(평균 0.22±0.09 μM)의 변동범위를 보였다(Fig. 2a). JR 1의 질산염은 1.48~4.44 μM(평균 2.66±1.11 μM), JR 2는 0.67~4.95 μM(평균 2.52±1.52 μM)의 변동범위로, 전반적으로 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2b). 암모니아는 JR 1에서 0.43~2.00 μM(평균 0.97±0.66 μM), JR 2에서 0.40~1.55 μM(평균 0.66±0.41 μM)의 변동범위를 보였다(Fig. 2c). 질산염, 아질산염, 암모니아의 합인 DIN은 JR

1에서 2.13~6.63 μM(평균 3.83±1.61 μM), JR 2에서 1.47~6.78 μM(평균 3.39±1.80 μM)의 변동범위로 질산염과 유사한 변동 경향을 보였다(Fig. 2d). DIP는 JR 1에서 0.10~0.68 μM(평균 0.43±0.21 μM), JR 2에서 0.05~0.95 μM(평균 0.49±0.33 μM)의 변동범위로 DIN과 상반되게 전반적으로 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2e). DSi는 JR 1에서 2.40~44.10 μM(평균 18.35±14.49 μM), JR 2에서 5.30~29.30 μM(평균 13.61±9.39 μM)의 변동범위를 보였으며, 8월 2일까지 증가하다가 이후 급격히 감소하였다(Fig. 2f).

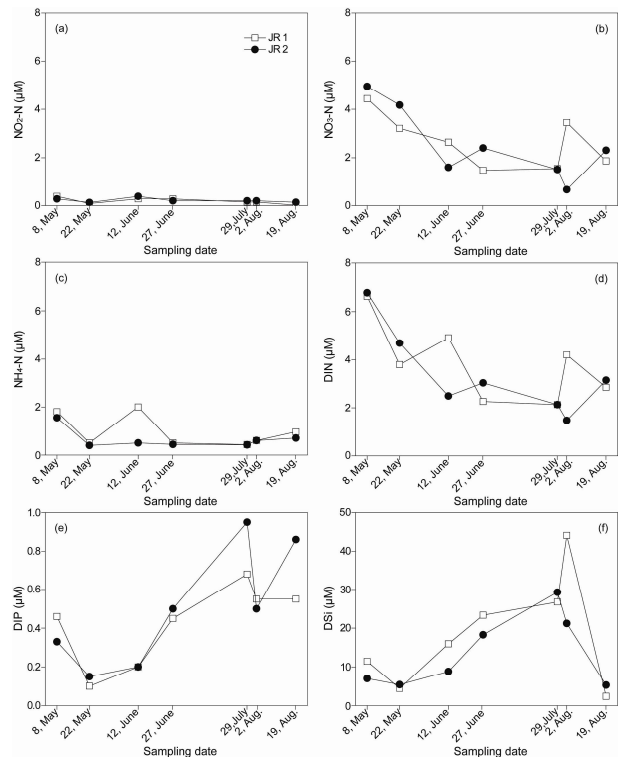


Fig. 2. Temporal variations of (a) nitrite (NO₂-N), (b) nitrate (NO₃-N), (c) ammonium (NH₄-N), (d) dissolved inorganic nitrogen (DIN), (e) dissolved inorganic phosphorus (DIP) and (f) dissolved silicate (DSi) in the western coast of Jaran Bay from May 8 to August 19.

식물플랑크톤의 성장에 중요한 질소, 인, 규소는 각 영양염의 비에 따라 제한영양염이 결정된다(Dufour et al., 1999). Dortch and Whitledge(1992)에 의하면, DIN이 1.0 μM, DIP가 0.2 μM, DSi가 2.0 μM 이하로 관찰되는 해역에서 식물플랑크톤의 증식에 필요한 절대 영양염의 제한을 받는 것으로 보고하였다. Justic et al.(1995)이 제시한 상호복합적으로 연관되는 화학량론적 제한(stoichiometric limitation)에서, 인 제한은 DSi : DIP>22 그리고 DIN : DIP>22이며, 질소 제한은

DIN : DIP < 10 그리고 DSi : DIN > 1이며, 규소 제한은 DSi : DIP < 10 그리고 DSi : DIN < 1로 평가하고 있다. 이 기준치에 의거하여 자란만 서부 연안의 제한영양염을 평가하면(Fig. 3), 조사기간 동안 DSi의 제한은 없는 것으로 보이며, 조사 초기(5월 8일~5월 22일)에는 인 제한 환경이며, 6월 27일 이후로는 질소 제한 환경으로 나타났다.

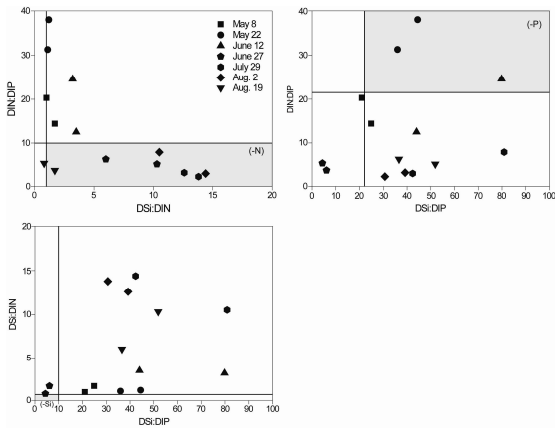


Fig. 3. Scatter diagrams of atomic nutrient ratios in the western coast of Jaran Bay from May 8 to August 19. Stoichiometric (=potential) limitation is indicated by -N, -P and -Si.

식물플랑크톤 현존량은 JR 1에서 $3.7\sim 283.8 \times 10^4$ cells/L(평균 $114.9 \pm 125.5 \times 10^4$ cells/L)의 변동범위를 보였으며, JR 2에서 $3.4\sim 303.1 \times 10^4$ cells/L(평균 $89.1 \pm 107.5 \times 10^4$ cells/L)의 변동범위를 보였다(Fig. 4). JR 1과 JR 2에서 유사한 변동경향을 보였으며, 7월 29일에 가장 낮은 현존량을 보였고, JR 1은 6월 27일, JR 2는 8월 19일에 가장 높은 현존량을 보였다(Fig. 4).

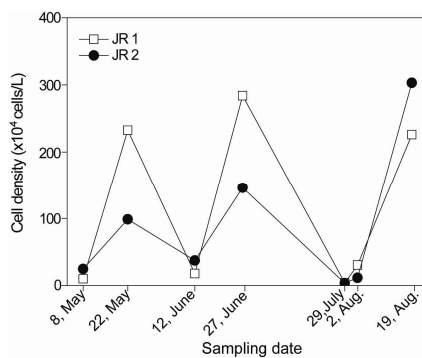
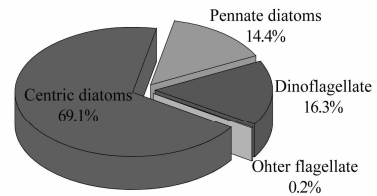


Fig. 4. Temporal variation of phytoplankton abundance in the western coast of Jaran Bay from May 8 to August 19.

조사기간동안 자란만 서부 연안에서 출현한 식물플랑크톤은 JR 1에서 규조류 중 중심목 규조류가 9속 26종, 우상목 규조류가 15속 17종으로 전체 83.5%를 차지하였으며, 와편모조류가 15속 29종으로 16.3%, 규질편모조류가 1속 2종으로 0.03% 그리고 유글레나조류 1속 1종으로 0.1%의 점유율을 보였다(Fig. 5). JR 2에서는 규조류 중 중심목 규조류가 11속 26종, 우상목 규조류가 16속 20종으로 전체 88.6%를 차지하였고, 와편모조류가 12속 21종으로 11.0%, 규질편모조류가 1속 1종으로 0.02% 그리고 유글레나조류 1속 1종으로 0.4%의 점유율을 보였다(Fig. 5). 우점종을 살펴보면(Table 1), JR 1에서는 6월 12일 규조류 *Cerataulina pelagica*가 37.1%로 제 1 우점종으로 출현한 것을 제외하면 *Chaetoceros* spp.가 제 1 우점종으로 출현하였다. JR 2에서는 규조류 *Chaetoceros* spp., *Cerataulina pelagica*, *Navicula* spp., *Nitzschia* spp.가 제 1 우점종으로 출현하였다. 특히, 6월 27일에는 와편모조류 *Prorocentrum minimum*이 JR 1에서 26.1%, JR 2에서 41.3%의 우점율을 보였다.

JR 1



JR 2

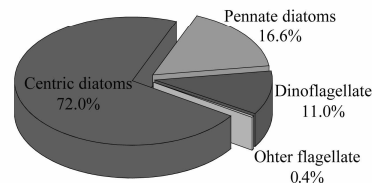


Fig. 5. Species composition of phytoplankton in the western coast of Jaran Bay from May 8 to August 19.

3.2 *C. polykrikoides*의 생리학적 자료를 바탕으로 적조 미발생 원인 분석

자란만 인근 해역의 풍향을 기상청에서 발간되는 기상월보를 통해서 살펴보면, *C. polykrikoides*가 출현하기 전인 5월에는 남풍과 북풍계열의 바람이 비교적 유사한 속도로 번갈아가며 나타났으나, *C. polykrikoides*가 본격적으로 출현하기 시작한 6월부터는 남풍계열이 우세하였다. 자란만의 해수유동은 주로 조석의 영향을 받으며, 대조기 최강창조시에는 북서향류를 통해 외해수가 만 내부로 유입되며 대조기 최강낙조시에는 북동향류가 유입되는 것으로 알려져 있다(Kim, 2010). 뿐만 아니라 15일 주기의 유속을 평균한 조

Table 1. Temporal variations of dominance for dominant species in the western coast of Jaran Bay from May 8 to August 19

Sampling date	JR 1		JR 2	
	Dominant species	Dominance (%)	Dominant species	Dominance (%)
May 8	<i>Chaetoceros</i> spp.	56.4	<i>Chaetoceros</i> spp.	72.2
	<i>Nitzschia</i> spp.	16.8	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	6.5
	<i>Cylindrotheca closterium</i>	5.9	<i>Navicula</i> spp.	6.1
May 22	<i>Chaetoceros</i> spp.	97.5	<i>Chaetoceros</i> spp.	84.5
	<i>Leptocylindrus danicus</i>	0.5	<i>Skeletonema costatum</i>	10.4
	<i>Paralia sulcata</i>	0.3	<i>Leptocylindrus danicus</i>	1.0
June 12	<i>Cerataulina pelagica</i>	37.1	<i>Cerataulina pelagica</i>	56.6
	<i>Leptocylindrus danicus</i>	14.6	<i>Chaetoceros</i> spp.	16.4
	<i>Nitzschia</i> spp.	10.7	<i>Nitzschia</i> spp.	11.6
June 27	<i>Chaetoceros</i> spp.	29.4	<i>Prorocentrum minimum</i>	41.3
	<i>Prorocentrum minimum</i>	26.1	<i>Nitzschia</i> spp.	39.2
	<i>Nitzschia</i> spp.	15.8	<i>Chaetoceros</i> spp.	14.6
July 29	<i>Chaetoceros</i> spp.	40.5	<i>Navicula</i> spp.	29.4
	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	21.6	<i>Chaetoceros</i> spp.	23.5
	<i>Navicula</i> spp.	13.5	<i>Gymnodinium catenatum</i>	11.8
August 2	<i>Chaetoceros</i> spp.	47.9	<i>Nitzschia</i> spp.	26.7
	<i>Nitzschia</i> spp.	30.2	<i>Chaetoceros</i> spp.	24.4
	<i>Gonyaulax</i> spp.	2.9	<i>Navicula</i> spp.	11.3
August 19	<i>Chaetoceros</i> spp.	89.7	<i>Chaetoceros</i> spp.	92.3
	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	5.5	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	3.5
	<i>Cylindrotheca closterium</i>	1.9	<i>Cylindrotheca closterium</i>	2.1

석 잔차류를 살펴본 결과 일반적으로 만의 입구에서는 북서향류가 나타나고 이러한 해수의 흐름은 만 내로 유입되어 반시계 방향으로 회전한 뒤 외해로 방출된다(Kim, 2010). 또한 Seo(2013)에 의하면 Lagrangian 방법에 근거한 입자 추적자 모델을 이용하여 육지도 부근에 위치한 적조가 자란만 내부로 확산될 수 있음을 확인바 있다. 뿐만 아니라 Lee(2011)에 의하면 real-time PCR 법을 통한 자란만 내의 *C. polykrikoides* rDNA copy 검출 결과 자란만 서부 해역에서 휴면포자의 검출량이 높게 나타난 것으로 보고하여 적조의 발생과 소멸을 반복하는 적조발생의 상습지역으로 보고하였다. 이처럼 자란만 서부 연안은 *C. polykrikoides*의 자체 발생과 해류를 통한 집적으로 적조 발생 가능성이 매우 높은 상황이지만 적조 미발생 원인을 자란만 서부 연안의 영양염 자료 및 기존에 보고된 *C. polykrikoides*의 생리학적 자료를 바탕으로 접근해 보았다.

반포화상수(K_s ; half-saturation constant)는 제한 영양염에 대한 친화성을 지시하는 지표로 이용되며, 일반적으로 K_s 값이 낮은 경우 저농도의 영양염 조건에서 성장에 유리한 생리특성을 갖는다(Dugdale, 1967). 또한 세포의 크기가 큰 종은 높은 K_s 값을 보이고, 외양성 종(oceanic species)의 K_s 값은 연안성 종(neritic species)보다 낮고, 성장률이 높은 종일수록 낮은 종보다 K_s 값이 낮은 경향을 보인다(Eppley et al., 1969). 기존에 보고된 *C. polykrikoides*의 질산염, 암모니

아, 인산염에 대한 성장 및 흡수동력학으로부터 도출된 K_s 값은 자란만 서부 연안에서 우점종으로 출현한 규조류 *Chaetoceros* sp., *Leptocylindrus danicus* 및 *Skeletonema costatum*에 비해서 높은 값을 보였다(Table 2). 또 다른 영양염 친화성 지수를 지시하는 $\alpha(\mu_{max}/K_s$; Harrison et al., 1989) 값 경우 *C. polykrikoides*는 규조류들에 비해서 낮은 값을 보였다(Table 2). 따라서 *C. polykrikoides*는 규조류에 비해서 무기 영양염에 대한 친화성이 낮은 것을 의미한다. 특히, 자란만 서부 연안의 영양염 농도는 규조류들의 K_s 값보다는 높은 반면 *C. polykrikoides*보다는 낮은 수준으로 *C. polykrikoides*는 규조류와의 종 경쟁에서 불리한 위치에 있는 것을 알 수 있다.

영양염의 제한은 식물플랑크톤 군집의 천이에도 영향을 미치며, 식물플랑크톤 종들이 각각 다른 영양염에 의해서 증식이 제한되더라도 여러 종의 식물플랑크톤이 공존할 수 있으나 상대적인 개체수는 제한하는 영양염의 비에 의해서 조절된다(Tilman et al., 1982). Kim(2003)의 영양염 제한조건에서 반연속배양(semi-continuous culture)에 따른 성장동력학 결과, *C. polykrikoides*의 세포내 질소(Q_{N0})와 인(Q_{P0})의 함량비는 14.2로 Redfield ratio(16) 보다 낮았다(Tables 3, 4). 또한 최대성장속도(μ'_{max} : 영양염이 무한대일 때 최대 성장속도)는 각각 질소제한조건에서 0.48/day, 인 제한 조건에서 0.54/day로 인 제한 조건에서 높은 성장속도를 보였다. 이로부터

Table 2. Comparison of half-saturation constants (Ks) and maximum growth rate (μ_{max}) for nitrate, ammonium and phosphate between *C. polykrikoides* and various diatoms

	Species	Ks (μM) / μ_{max} (/day)			References
		Nitrate	Ammonium	Phosphate	
Diatom	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (Virgin Island, USA)	0.62/-	-	-	Anderson and Roles, 1981
	<i>Chaetoceros didymus</i> (Gamak Bay, Korea)	-	-	0.36/1.05	Kwon, 2010
	<i>Chaetoceros debilis</i> (-)	-	0.50/-	-	Conway and Harrison, 1977
	<i>Chaetoceros gracilis</i> (Cost Rica Dome, Cost Rica)	0.3/-	0.5/-	-	Eppley et al., 1969
	<i>Chaetoceros neglectum</i> (-)	1.4/1.52	-	-	Sommer, 1986
	<i>Leptocylindrus danicus</i> (La Jolla, USA)	1.2/-	0.9/-	-	Eppley et al., 1969
	<i>Navicula</i> sp. (Ems-Dollard estuary, Netherlands)	-	-	0.1/0.76	Admiraal, 1977
	<i>Nitzschia</i> sp. (-)	0.8/0.59	-	-	Sommer, 1986
	<i>Skeletonema costatum</i> (Gamak Bay, Korea)	-	-	0.38/1.19	Kwon, 2010
	<i>Skeletonema costatum</i> (Long Island Sound, USA)	0.4/-	-	-	Lomas and Glibert, 2000
	<i>Skeletonema costatum</i> (Long Island Sound, USA)	0.5/-	0.8/-	-	Eppley et al., 1969
Dinoflagellate	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> (Yatsushiro sea, Japan)	2.16/-	1.99-	1.39/-	Kim, 2003
	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> (South Sea, Korea)	2.10/0.48	1.03/-	0.57/0.54	Kim et al., 2001

*C. polykrikoides*의 경우 인에 비해서 상대적으로 질소에 대한 의존성이 높은 생리학적 특성을 갖는 것으로 추정할 수 있다. 특히, 자란만 서부 연안의 DIN:DIP 비는 *C. polykrikoides* 적조 발생 전(5월 8일~6월 27일)에는 식물플랑크톤 성장에 인이 제한된 환경이었지만, 적조 발생기간(7월 29일~8월 19일) 동안에는 질소 제한환경이었다(Fig. 3). 따라서 *C. polykrikoides* 적조 발생기간 동안의 낮은 DIN:DIP 비는 질소에 대한 의존적인 생리특성을 보이는 *C. polykrikoides*가 적조로 발달하기 위해서 불리한 환경으로 생각된다.

C. polykrikoides 적조의 발달은 바람, 수온, 염분 등의 물리학적 요인(Choi, 2001; Lee, 2008), 영양염 등의 화학적 요인(Yang et al., 2000; Lee, 2006)과 생물 종간의 경쟁 및 포식 등의 생물학적 요인(Lim et al., 2002)이 상호 작용하는 것으로 알려져 있다. 특히, *C. polykrikoides*의 고밀도 증식을 위해서는 영양염의 공급과 큰 관련성을 가진다고 여러 연구에서 밝혀졌다(Lee et al., 2007; Kang et al., 2009). *C. polykrikoides*의 대규모 적조가 형성된 지난 2003년(약 48×10^3 cells/mL)과 2007년(약 33×10^3 cells/mL) 적조발생 해역의 질산염 및 인산염의 농도는 2003년에 각각 0.95~88.23 μM , 0.05~4.75 μM (Lee et al.,

2007), 2007년에 각각 2.35~6.25 μM , 0.39~0.69 μM (Kang et al., 2009)로 조사되었다. 하지만 자란만 서부 연안의 경우 적조 발생 시기에 질산염과 인산염이 각각 0.67~3.45 μM , 0.50~0.95 μM 로 앞선 시기에 비해서 인산염의 농도는 유사하지만, 질산염은 매우 낮은 농도였다(Fig. 2b, e). Lee(2006)에 따르면 *C. polykrikoides*가 대규모 적조로 발달하기 위해서는 많은 강우와 다량의 담수유입에 따른 영양염 공급(특히, 질소)이 중요한 요인으로 제시하였으며, *C. polykrikoides* 적조발생 해수에 인을 첨가한 실험구(약 36 μM)에 비해서 질소 첨가 실험구(약 882 μM)에서 증식량이 증가하는 것을 관찰하였다. 뿐만 아니라 다수의 연구에서도 하계의 집중강우 후 질소의 공급이 *C. polykrikoides* 적조의 유발요인으로 지적하였다(Yang et al., 2000; Lee et al., 2007). 특히, 자란만과 가장 가까운 통영 기상관측소에서 관측된 적조 발생기간 동안의 강수량은 약 2 mm/day(<http://www.kma.go.kr>)로, 2003년과 2007년의 약 11 mm/day(Lee, 2006; Kang et al., 2009)에 비해서 매우 낮은 강수량을 보였다. 따라서 자란만 서부 연안에서 낮은 강수량 및 담수 유입에 따른 영양염 공급의 부족은 *C. polykrikoides*의 출현을 제한시키는 요인으로 작용한 것으로 생각된다.

Table 3. Comparison of maximum uptake rate (ρ_{\max}), minimum cell quota (Q_{N0}) and maximum specific uptake rate (V_{\max}) for nitrogen between *C. polykrikoides* and various diatoms

	Species	Constants			References
		ρ_{\max} (pmol/cell/hr)	Q_{N0} (pmol/cell)	V_{\max} (/day)	
Diatom	<i>Chaetoceros debilis</i> (-)	-	0.12	1.44	Conway and Harrison, 1977 Harrison et al., 1977
	<i>Chaetoceros</i> sp. (Chesapeake Bay, USA)	0.024	0.021	2.74	Lomas and Glibert, 2000
	<i>Skeletonema costatum</i> (Booth Bay, USA)	0.063	0.65	2.33	Lomas and Glibert, 2000
	<i>Skeletonema costatum</i> (-)	-	0.05	0.84	Conway and Harrison, 1977 Harrison et al., 1977
Dinoflagellate	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> (Yatsushiro sea, Japan)	1.89	5.25	8.64	Kim, 2003

Table 4. Comparison of maximum uptake rate (ρ_{\max}), minimum cell quota (Q_{P0}) and maximum specific uptake rate (V_{\max}) for phosphorus between *C. polykrikoides* and various diatoms

	Species	Constants			References
		ρ_{\max} (pmol/cell/hr)	Q_{P0} (pmol/cell)	V_{\max} (/day)	
Diatom	<i>Chaetoceros debilis</i> (-)	-	0.025	1.63	Conway and Harrison, 1977 Harrison et al., 1977
	<i>Skeletonema costatum</i> (Long Island Sound, USA)	0.0384	-	-	Eppley et al., 1969
	<i>Skeletonema costatum</i> (-)	-	0.013	0.96	Conway and Harrison, 1977 Harrison et al., 1977
	<i>Thalassiosira pseudonana</i> (-)	-	-	1.93	Peters et al., 2006
	<i>Coscinodiscus</i> sp. (Jakarta Harbor, Indonesia)	-	-	0.27	Peters et al., 2006
	Dinoflagellate	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> (Yatsushiro sea, Japan)	0.35	0.37	22.7

앞서 언급하였듯이 Sommer(1989)는 식물플랑크톤의 영양염 흡수전략을 성장전략과 저장전략으로 제시하였으며, 영양염이 풍부한 환경에서는 성장전략을 가지는 종이 우점하며, 영양염이 낮은 환경 또는 일시적으로 영양염 공급과 제한이 반복되는 환경에서는 저장전략을 가지는 종이 우점 할 수 있다. 자란만 서부 연안에서 우점분류군인 규조류는 낮은 영양염 흡수능력을 보이는 반면, 상대적으로 무기태 영양염에 대한 높은 친화력과 빠른 성장속도를 보이기에(Tables 2, 3, 4), 영양염 흡수전략 중 성장전략 종으로 생각된다. 반면에 *C. polykrikoides*는 무기태 영양염에 대한 친화성과 성장속도는 낮지만 높은 세포내 영양염 함유량 및 흡수속도를 보이기에(Tables 2, 3, 4), 저장전략 종으로 생각된다. 따라서 *C. polykrikoides*는 비교적 높은 영양염 농도에 필요량 이상의 영양염을 흡수하여 영양염의 공급이 없을 경우 축적된 영양염을 이용하여 성장할 수 있을 것이다. 특히, 자란만 서부 연안에서 5월의

인산염과 질산염은 비교적 높아 *C. polykrikoides*가 우점할 수 있는 환경이었으나, 남해안에서 *C. polykrikoides*의 대규모 적조가 발생한 이후로는 인산염은 풍부하나 질소계열의 영양염은 낮았기 때문에 저장전략의 *C. polykrikoides*는 성장전략의 규조류들에 비해서 불리할 것으로 생각된다.

한편, 식물플랑크톤의 대사과정에서 생성되는 2차 대사산물이 체외로 분비되어 다른 식물플랑크톤의 증식에 부정적인 영향을 미치기도 하며, 이를 타감작용(allopathy)이라고 한다(Rizvi and Rizvi, 1992). Uchida et al.(1996)은 규조류 *Chaetoceros didymus*, *Stephanopix palmeriana*, *Limcomphora* sp.와 와편모조류 *Heterocapsa circularisquama*의 혼합배양에서 규조류의 증가와 함께 *H. circularisquama*는 휴면포자(temporary cyst)가 되어 성장이 억제되는 것을 관찰하였으며, 이 메카니즘에 대해서는 불명확하지만 규조류로부터 분비되는 지용성 물질에 따른 영향으로 설명하였다. 와편모조류 *Alexandrium*

tamarensis 또한 규조류 *Thalassiosira* sp.와 *Chaetoceros* sp.의 배양액에서 성장이 억제되는 것을 관찰되었다(Sekiguchi et al., 2000). 이와 같은 현상이 자연환경에서 어느 정도 개체군 증식에 영향을 주는지는 불명확하나, 식물플랑크톤이 고농도로 존재할 시 생물 간의 간섭 및 타감작용은 충분히 개체군 증식에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 하지만 동일 속에서도 종에 따라 유발되는 타감작용이 다르며, 영향을 받는 생물 또한 종에 따라 차이가 나기 때문에 더욱 세밀한 생리학적 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결론

지난 2013년 7월 17일 전남 고흥 연안에서 발생한 *C. polykrikoides* 적조는 51일간 지속되다가 9월 5일을 기하여 적조주의보 해제로 소멸했다. 특히, 이번에 발생한 적조의 경우 2003년 이후 지난 10년 중 가장 이른 시일에 발생하였으며, 최대밀도의 경우 8월 6일 통영 연안에서 34,000 cells/mL로 측정되어 2003년 48,000 cells/mL에 이어 지난 10년 사이 두 번째로 높은 수치를 기록했다. 그 확산 범위는 예년에는 주로 남해안에만 국한되었던 것이 이번에는 전남 고흥에서 발생하여 강원 양양 해역까지 확산되어 지난 10년 중 가장 광범위했다. 이러한 광범위한 발생에도 불구하고, 본 연구해역인 남해 자란만 서부 연안의 경우 *C. polykrikoides*의 유영세포가 관찰되지 않았으며, *Chaetoceros* sp. 등의 규조류에 의한 우점현상이 두드러지게 나타났다. 특히, 자란만 서부 연안의 낮은 무기 영양염 환경 하에서 *C. polykrikoides*는 규조류와의 종 경쟁을 위해서 비교적 불리한 생리학적 특성을 보이는 것으로 판단되었다. 하지만 *C. polykrikoides*는 저층의 풍부한 영양염을 흡수할 수 있는 연직운동이 가능하며(Park et al., 2001), 소형 식물플랑크톤과 섬모충류 등을 포식할 수 있는 혼합영양(Jeong et al., 2004) 및 용존 유기 영양염류를 이용할 수 있는 능력(Kim, 2003; Gobler et al., 2012)이 있으며, 이는 다른 식물플랑크톤과의 무기 영양염의 경쟁에 대한 불리한 생리학적 특성을 극복하기 위한 방안으로 제시되었다. 그럼에도 불구하고 *C. polykrikoides*가 출현하기 이전에 *Chaetoceros* 등의 규조류가 자란만 서부 연안에서 급속한 증식을 이루고 있었으며, 남해안에서 *C. polykrikoides* 적조 발생 이후에도 내만역을 중심으로 규조류의 우점현상이 지속되고 있었다. 따라서 자란만 서부 연안으로 뚜렷한 영양염의 공급이 이루어지지 않았기 때문에 규조류와의 무기 영양염 경쟁에서 불리한 위치에 있는 *C. polykrikoides*는 규조류의 번무에 따라 출현이 억제된 것으로 생각된다.

사 사

본 논문은 부경대학교 해양과학공동연구소의 지원에 따라 수행된 연구로 지원기관에 감사를 표합니다.

References

- [1] Admiraal, W.(1977), Influence of various concentration of orthophosphate on the division rate of an estuarine benthic diatom, *Navicula arenaria*, in culture, Marine Biology, Vol. 42, No. 1, pp. 1-8.
- [2] Anderson, S. M. and O. A. Roels(1981), Effects of light intensity on nitrate and nitrite uptake and excretion by *Chaetoceros curvisetus*, Marine biology, Vol. 62, No. 4, pp. 257-261.
- [3] Chihara, M. and M. Murano(1997), An illustrated guide to marine plankton in Japan, Tokai University Press, Tokyo, p. 1574.
- [4] Choi, H. Y.(2001), Oceanographic condition of the coastal area between Narodo Is. and Solido Is. in the Southern Sea of Korea and its relation to the disappearance of red-tide observed in Summer 1998, 『The Sea』 Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 6, No. 2, pp. 49-62.
- [5] Conway, H. L. and P. J. Harrison(1977), Marine diatoms grown in chemostats under silicate or ammonium limitation. IV. Transient response of *Chaetoceros debilis*, *Skeletonema costatum*, and *Thalassiosira gravida* to a single addition of the limiting nutrient, Marine Biology, Vol. 43, No. 1, pp. 33-43.
- [6] Dortch, Q. and T. E. Whitledge(1992), Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions?, Continental Shelf Research, Vol. 12, No. 11, pp. 1293-1309.
- [7] Dufour, P., L. Charpy, S. Bonnet and N. Gracia(1999), Phytoplankton nutrient control in the oligotrophic south Pacific subtropical gyre(Tuamotu Archipelago), Marine Ecology Progress Series, Vol. 179, pp. 285-290.
- [8] Dugdale, R. C.(1967), Nutrient limitation in the sea: Dynamics, identification and significance, Limnology and Oceanography, Vol. 12, No. 4, pp. 685-695.
- [9] Egge, J. K. and D. L. Aksnes(1992), Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition, Marine Ecology Progress Series, Vol. 83, No. 2, pp. 281-289.
- [10] Eppley, R. W., J. N. Rogers and J. J. McCarthy(1969),

- Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton, *Limnology and Oceanography*, Vol. 14, No. 6, pp. 912-920.
- [11] Escaravage, V., T. C. Prins, A. C. Smaal and J. C. H. Peeters(1996), The response of phytoplankton communities to phosphorus input reduction in mesocosm experiments, *Journal of Experimental Marine Biology Ecology*, Vol. 198, No. 1, pp. 55-79.
- [12] Gobler, C. J., A. Burson, F. Koch, Y. Tang and M. R. Mulholland(2012), The role of nitrogenous nutrients in the occurrence of harmful algal blooms caused by *Cochlodinium polykrikoides* in New York estuaries (USA), *Harmful Algae*, Vol. 17, pp. 64-74.
- [13] Hallaegraeff, G. M.(1991) *Aquaculturists guide to harmful Australian microalgae*, CSIRO, Fishing Industry Training Board of Tasmania Inc., Vol. 58, p. 11.
- [14] Harrison, P. J., H. L. Conway, R. W. Holmes and C. O. Davis(1977), Marine diatoms grown in chemostats under silicate or ammonium limitation. III. Cellular chemical composition and morphology of *Chaetoceros debilis*, *Skeletonema costatum*, and *Thalassiosira gravida*, *Marine Biology*, Vol. 43, No. 1, pp. 19-31.
- [15] Harrison, P. J., J. S. Parslow and H. L. Conway(1989), Determination of nutrient uptake kinetic parameters: a comparison of methods, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 52, No. 3, pp. 301-312.
- [16] Humborg C., V. Ittekkot, A. Cociasu and B. V. Bodungen(1997), Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure, *Nature*, Vol. 386, No. 6623, pp. 385-388.
- [17] Jeong, H. J., Y. D. Yoo, J. S. Kim, T. Y. Kim, J. H. Kim, N. S. Kang and W. H. Yih(2004), Mixotrophy in the phototrophic harmful alga *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae): prey species, the effects of prey concentration, and grazing impact, *Journal of Eukaryotic Microbiology*, Vol. 51, No. 5, pp. 563-569.
- [18] Justic, D., N. N. Rabalais, R. E. Turner and Q. Dortch (1995), Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences, *Estuarine Coastal Shelf Science*, Vol. 40, No. 3, pp. 339-356.
- [19] Kang, Y. S., Y. T. Park, W. A. Lim, E. S. Cho, C. K. Lee and Y. S. Kang(2009), A comparative study on outbreak scale of *Cochlodinium polykrikoides* blooms, 『The Sea』 *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 14, No. 4, pp. 229-239.
- [20] Kim, C. H.(2010), Development of bloom control techniques through life cycle elucidation of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. p. 225.
- [21] Kim, D. I.(2003), Physiological and ecological studies on harmful red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* (Margalef), Ph. D. Thesis, Kyushu University, Fukuoka, p. 154.
- [22] Kim, H. C., C. K. Lee, S. G. Lee, H. G. Kim and C. K. Kim(2001), Physico-chemical factors on the growth of *Cochlodinium polykrikoides* and nutrient utilization, *Journal of the Korean Fisheries Sciences*, Vol. 34, No. 5, pp. 445-456.
- [23] Kwon, H. K.(2010), Utilization of dissolved organic phosphorus and alkaline phosphatase activity of phytoplankton, M. Sc. Thesis, Pukyong National University, Busan, p. 86.
- [24] Lee, B. R.(2011), Bloom potential of harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* in the southern coast of Korea as assessed by real-time PCR assay. M. Sc. Thesis, Pukyong National University, Busan, p. 47.
- [25] Lee, D. K.(2008), *Cochlodinium polykrikoides* blooms and eco-physical condition in the South Sea of Korea, *Harmful Algae*, Vol. 7, pp. 318-323.
- [26] Lee, M. O. and J. H. Choi(2009), Distributions of water temperature and salinity in the Korea Southern Coastal Water during *Cochlodinium polykrikoides* Blooms, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 235-247.
- [27] Lee, Y. S.(2006), Factor affecting outbreaks of high-density *Cochlodinium polykrikoides* red tides in coastal seawaters around Yeosu and Tongyeong, Korea, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 52, No. 10, pp. 1246-1259.
- [28] Lee, Y. S., W. A. Lim and S. G. Lee(2007), Horizontal distributions of salinity and the concentrations of DIN and DIP after heavy rainfall events in areas of *Cochlodinium Polykrikoides* bloom occurrence, *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 16, No. 10, pp. 1119-1125.
- [29] Lim, W. A., C. S. Jung, C. K. Lee, Y. C. Cho, S. G. Lee, H. G. Kim and I. K. Chung(2002), The outbreak, maintenance, and decline of the red tide dominated by *Cochlodinium polykrikoides* in the Coastal Waters off Southern Korea from August to October, 2000, 『The Sea』 *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 7, No. 2, pp. 68-77.

- [30] Lomas, M. W. and P. M. Glibert(2000), Comparisons of nitrate uptake, storage, and reduction in marine diatoms and flagellates, *Journal of Phycology*, Vol. 36, No. 5, pp. 903-913.
- [31] Margalef, R.(1961), Hidrografia y fitoplancton de un area marina de la costa meridional de Puerto Rico, *Inv. Pesq.*, Vol. 18, pp. 33-96.
- [32] MLTM(2010), Ministry of Land, Transportation and Marine Affairs, Standard methods for marine environmental analysis, p. 495.
- [33] NFRDI(1997), National Fisheries Research and Development Institute, Recent red tide in Korean coastal waters, p. 280.
- [34] NFRDI(2004), National Fisheries Research and Development Institute, Harmful algal blooms in Korean coastal waters in 2002, 2003, p. 273.
- [35] Park, J. G., M. K. Jeong, J. A. Lee, K. J. Cho and O. S. Kwon(2001), Diurnal vertical migration of a harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae), during a red tide in coastal waters of Namhae Island, Korea, *Phycologia*, Vol. 40, No. 3, pp. 292-297.
- [36] Park, K. W., J. W. Park, S. H. Yoon and Y. S. Seo(2013), Occurrence of *Cochlodinium polykrikoides* bloom, 2013, 2013 Autumn Meeting on the Korea Society of Oceanography, p. 95.
- [37] Peters, F., L. Arin, C. Marrasé, E. Berdalet and M. M. Sala(2006), Effects of small-scale turbulence on the growth of two diatoms of different size in a phosphorus-limited medium, *Journal of Marine Systems*, Vol. 61, No. 3, pp. 134-148.
- [38] Rizvi, S. J. H. and V. Rizvi(1992), Allelopathy: basic and applied aspects, Chapman and Hall, London, p. 480.
- [39] Sekiguchi, K., Y. Kaga, S. Kaga and T. Ogata(2000), Effect of culture filtrates of various microalgae on the growth of toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense*. *Bulletin Iwate Prefecture Fisheries Technology Center*, Vol. 2, pp. 43-49.
- [40] Seo, H. S.(2013), Numerical experiment on the drift diffusion of harmful algal bloom in the western coastal waters in Korea. M. Sc. Thesis, Pukyung National University, Busan, p. 85.
- [41] Sommer, U.(1986), Nitrate-and silicate-competition among Antarctic phytoplankton, *Marine Biology*, Vol. 91, No. 3, pp. 345-351.
- [42] Sommer, U.(1989) The role of competition for resources in phytoplankton succession, In: *Plankton Ecology: Succession in Plankton Communities*, (ed.) Sommer, U., Springer-Verlag, New-York, pp. 57-106.
- [43] Tilman, D., S. S. Kilham and P. Kilham(1982), Phytoplankton community ecology: the role of limiting nutrients, *Annual Review Ecology and Systematics*, Vol. 13, pp. 349-372.
- [44] Tomas, C. R.(1997), Identifying marine phytoplankton, Academic Press, London, p. 858.
- [45] Turner, R. E., N. Qureshi, N. N. Rabalais, Q. Dortch, D. Justic, R. F. Shaw and J. Cope(1998), Fluctuating silicate: nitrate ratios and coastal plankton food webs, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 95, pp. 13048-13051.
- [46] Turquet, J., J. P. Quod, A. Couté and M. Faust(1998), Assemblage of benthic dinoflagellates and monitoring of harmful species in Réunion island (SW Indian Ocean) during the 1993-1996 period, In: *Harmful Algae*, (eds.) Reguera, B., J. Blanco, M. L. Fernandez and T. Wyatt, Xunta de Galicia and Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, pp. 44-47.
- [47] Uchida, T., Y. Matsuyama, M. Yamaguchi and T. Honjo(1996), Growth interactions between a red tide dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* and some other phytoplankton species in culture, In: *Harmful and Toxic Algal Blooms*, (eds.) Yasumoto, T., Y. Oshima and Y. Fukuyo, Unesco, Paris, pp. 369-372.
- [48] Whyte, J. N. C., N. Haigh, N. G. Ginther and L. J. Keddy(2001), First record of blooms of *Cochlodinium* sp. (Gymnodinales, Dinophyceae) causing mortality to aquacultured salmon on the west coast of Canada, *Phycologia*, Vol. 40, No. 3, pp. 298-304.
- [49] Yang, J. S., H. Y. Choi, H. J. Jeong, J. Y. Jeong and J. K. Park(2000), The outbreak of red tides in the Coastal Waters off Kohung, Chonnam, Korea: I. Physical and chemical characteristics in 1997, 「The Sea」 *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 5, No. 1, pp. 16-26.
- [50] Yuki, M. and S. Yoshimatsu(1989), Two fish-killing species of *Cochlodinium* from Harima Nada, Seto Inland Sea, Japan, In: *Red Tides: Biology, Environmental Science, and Toxicology*, (eds.) Okaichi, T., D. M. Anderson and T. Nemoto, Elsevier, Amsterdam, pp. 451-454.

원고접수일 : 2014년 05월 26일

원고수정일 : 2014년 08월 11일

게재확정일 : 2014년 08월 27일