Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Research Paper
Vol. 20, No. 1, pp. 001-010, February 28, 2014, ISSN 1229-3431(Print) / ISSN 2287-3341(Online) http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2014.20.1.001

무각 와편모조류 *Akashiwo sanguinea*의 수온, 염분 그리고 광 조건에 따른 생장반응과 그에 따른 종 천이의 이점

권형규* · 오석진**†
* 부경대학교 해양과학공동연구소, ** 부경대학교 해양학과

Growth Response of the Dinoflagellate *Akashiwo sanguinea* in Relation to Temperature, Salinity and Irradiance, and its Advantage in Species Succession

Hyeong-Kyu Kwon* · 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 : 자란만에서 분리한 와편모조류 *Akashiwo sanguinea*의 성장에 대한 수온, 염분 및 광 조건을 실내실험을 통해서 살펴보았다. *A. sanguinea*의 최대성장속도(0.28 day^{-1})는 수온 25℃, 염분 30 psu로 나타났으며, 최적성장(최대성장속도의 80 % 이내 구간)은 수온 25℃의 염분 15～35 psu로 나타났다. 따라서 *A. sanguinea*는 고수온의 협온성이며, 광염성의 생리학적 특성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 광량에 따른 성장 실험결과에서 유도된 성장식은 $\mu=0.31(I-16.87)/(I+51.19)$로, 보상광량($I_0$) 값은 16.87 μmol m^{-2} s^{-1}, 반포화광량(K_I) 값은 84.93 μmol m^{-2} s^{-1}으로 나타났다. 결론적으로 *A. sanguinea*는 하계에 충분한 광, 높은 수온, 염분의 변동 폭이 큰 연안해역에서 종 천이를 위한 유리한 생리학적 특성을 보이는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 와편모조류, *Akashiwo sanguinea*, 수온, 염분, 광

Abstract : *The effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the dinoflagellate Akashiwo sanguinea isolated from Jaran Bay were examined in the laboratory. Maximum specific growth rate(0.28 day^{-1}) was observed with combination of 25 ℃ and 30 psu. Optimal growth (≥80 % of maximum specific growth rate) was obtained at 25 ℃ with salinities of 15～35 psu. This results indicated that A. sanguinea is a stenothermal of the high water temperature and euryhaline species. The irradiance-growth curve was described as $\mu=0.31(I-16.87)/(I+51.19)$. The compensation photon flux density (I_0) and half-saturation photon flux density (K_I) were 16.87 μmol m^{-2} s^{-1} and 84.93 μmol m^{-2} s^{-1}, respectively. In conclustion, A. sanguinea has advantage physiological characteristics for the species succession at the coastal areas in summer with sufficient irradiance, high water temperature and large salinity gradient.*

Key Words : *Dinoflagellate*, *Akashiwo sanguinea*, *Temperature*, *Salinity*, *Irradiance*

1. 서 론

우리나라에서 적조(red tides)는 1970년대에 일부 반폐쇄성 내만 해역에서 간헐적으로 관찰되었으나, 1980년대 이후 적조발생 건수가 연간 30여건 이상으로 증가하기 시작하였고(Kim, 2005), 1990년대에는 연평균 45건 이상으로 발생빈도가 급격히 증가하였다(NFRDA, 1998). 특히, 1990년대 이후에는 적조 발생 건수의 증가뿐만 아니라 적조원인 생물종도 규조류에서 편모조류로 바뀌는 특징을 보였으며, 1980년대 기점으로 *Cochlodinium polykrikoides*와 같은 무각 와편모조류의 적조발생빈도가 증가하였다(NFRDA, 1998). 이에 따라 어업 및 양식업, 관광산업 등의 경제적 피해도 증가하고 있어, 적조현상은 현재 심각한 사회·경제적인 문제 중 하나로 대두되고 있다(NFRDA, 2000; NFRDI, 2002).

본 연구의 대상종은 무각 와편모조류 *Akashiwo sanguinea*

* First Author : kwon124@pknu.ac.kr, 051-629-6572
† Corresponding Author : sjoh1972@pknu.ac.kr, 051-629-6576

(Hiraska) G. Hansen et Moestrup는 이전에 *Gymnodinium sanguineum, Gymnodinium splendens, Gymnodinium nelsonii* 등의 다양한 종명으로 지칭되었다(Daugbjerg et al., 2000). 이 종은 현재 우리나라에서 유해·유독한 적조생물로 알려져 있지 않지만, 고밀도로 발생할 경우 어패류의 질식사와 2차적인 빈산소 수괴를 형성하여 해양생태계에 막대한 피해를 입힐 수 있는 것으로 알려져 있다(Kim, 2005). 국외에서 *A. sanguinea*는 적조발생시 부분적인 수산생물 폐사가 보고됨으로써 잠재적인 유해성 종으로 추정되고 있으며(Botes et al., 2002), 우리나라와 가까운 일본의 Ariake 해의 경우 김의 황백화 현상을 발생시키는 원인생물로 주목을 받고 있다(Matsubara et al., 2007). 특히, 우리나라에서는 2000년대 이후 *A. sanguinea*에 의한 적조가 남해안에서 주로 발생하고 있으나 울산연안의 내만역에서도 적조를 형성하여 광범위하게 출현하는 것으로 나타났다.

한편, 식물플랑크톤의 이상 증식에 영향을 주는 대표적인 환경요인으로 수온, 염분 그리고 광 조건과 같은 물리·광학적 요인이 있으며, 이는 생·화학적인 요인과 함께 식물플랑크톤의 증식에 복합적으로 영향을 미친다. 식물플랑크톤은 종 특이성에 따라 생장에 적합한 최적수온, 염분 및 조도를 가지고 있으며(Okaichi, 2003; Kim, 2005), 결과적으로 연안내만에 상습적으로 적조를 유발시키는 종을 대상으로 기본적인 생리·생태학적 특성을 파악하는 것이 적조 발생 시기를 예측하는데 유용하다고 할 수 있다. 따라서 적조 생물을 분리 배양하여 실험실에서 최적 환경조건을 규명하는 것은 현장에서 대발생 기작을 유추하는데 많은 도움이 된다. 하지만 실질적으로 우리나라에서는 심각한 수산피해를 입힌 특정종 *C. polykrikoides*에 관해서는 많은 연구가 진행되어 왔으나(Lee and Choi, 2009; Oh et al., 2010; Lee et al., 2012), 다른 대다수의 적조생물에 관해서는 극히 간헐적인 연구만이 진행 되어있다. 특히 *A. sanguinea*와 같은 무각 와편면조류에 대한 국내 연구는 형태 및 유전자 분석 정보에 따른 분류학적인 연구가 대부분이며(Ki and Han, 2006; Park et al., 2008), 적조발생기작을 밝힐 수 있는 생리·생태학적 측면에서 접근한 연구는 거의 전무한 실정이다. 본 연구는 우리나라 연안해역에 출현하는 *A. sanguinea*의 생리·생태적 특성을 파악하기 위한 첫 번째 단계로 경상남도 고성 자란만에 분리한 *A. sanguinea*의 성장에 영향을 미치는 수온, 염분 및 광 조건을 실내실험을 통하여 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1 *Akashiwo sanguinea*의 분리 및 유지배양

*A. sanguinea*는 2009년 7월 자란만의 표층수(34°55′9.14″N, 128°14′25.09″E)를 채수한 후(Fig. 1), pasteur pipette(Ø 50~100 μm)을 이용하여 분리하였다(Guillard, 1995). 분리된 세포는 여과해수(0.22 μm pore size, Millipore GSWP, USA)를 이용하여 3~4회 반복 세척하여 분리주를 확보하였다. 사용된 배지는 동해 외양수(N36°24′938″, E130°42′055″)를 바탕으로 한 개량형 f/2 배지를 이용하였으며(Guillard and Ryther, 1962), 배양튜브에 50 ml 첨가 후, *A. sanguinea*를 이식하였다. 배양 시 온도, 염분 그리고 광 조건은 채수한 당시의 현장조건과 유사하게 20℃, 30 psu 그리고 300 μmol m^{-2} s^{-1}(12L:12D; cool-white fluorescent lamp; FHF32SS, Kumho, Korea)하에서 계대배양을 하였다. *A. sanguinea*에 대한 무균화 처리는 하지 않았지만, 2차 생물학적 오염을 막기 위해서 모든 실험기구는 고압멸균(202 kpa, 20 min) 및 건조멸균(120℃, 3 hr)시켜 사용하였다.

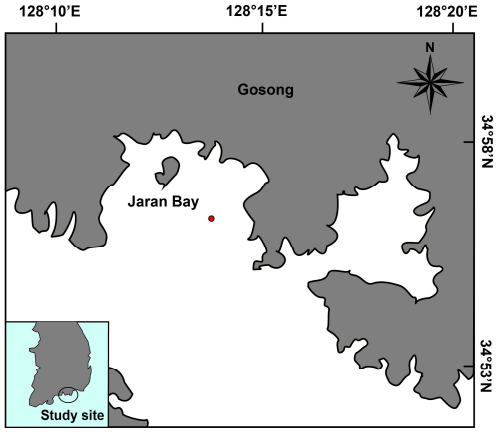

Fig. 1. Map showing isolation site of the vegetative cell of *Akashiwo sanguinea* in Jaran Bay, Korea.

2.2 수온과 염분 단계별 성장속도 변화

수온과 염분에 따른 *A. sanguinea*의 세포밀도의 증감은 현미경을 이용한 직접 검경이 아닌 *in vivo* chlorophyll 형광값을 활용하였으며, 세포밀도는 *in vivo* chlorophyll 형광값과 세포밀도 사이의 높은 상관관계로부터 도출되었다. 이러한 방법은 형광광도계에서 직접 측정이 가능한 배양튜브를 이용하기에 세포밀도의 확인을 위한 배양튜브의 개폐가 없어 초기 배양상태를 계속 유지 할 수 있고, 대량의 표본을 신속히 처리 할 수 있다(Brand et al., 1981). *in vivo* chlorophyll 형광값과 세포밀도의 관계를 파악하기 위해, 현장수온과 염분에 상응하는 조건(20℃, 30 psu)하에서 대수성장기가 될 때까지 배양하였다. 이후 농축과 희석을 통해 여러 단계의 세포밀도를 조제하였다. 이때 광학도립현미경(TE 2000, Nikon, Japan)에서 조제된 세포밀도를 직접 계수하였으며, 이에 해당하는 형광값을 형광광도계(Model 10-AU-005, Turner Designs, USA)를 이용하여 측정하였다. 측정은 안정한 형광값을 얻기 위해서 약 5분 동안 암조건에서 방치하여, 광계 II와 I의 전자 흥분

상태를 약화시키고 측정하였다(Brand et al., 1981). 그 결과 세포밀도와 형광값 사이에는 Fig. 2와 같이 통계적으로 매우 높은 유의성이 확인되었다. 따라서 *A. sanguinea*의 세포밀도는 현미경 하에서 직접 검경이 아닌 *in vivo* chlorophyll 형광값을 측정한 후 Fig. 2에 제시된 관계식으로부터 간접적으로 산출하였다.

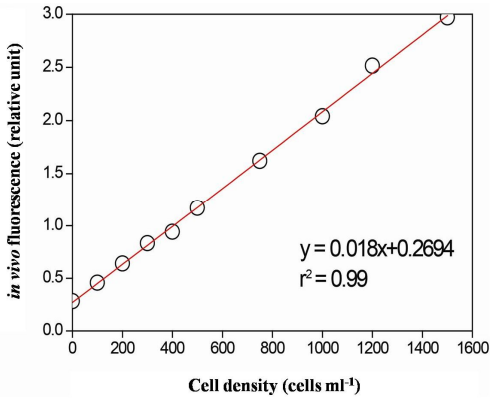

Fig. 2. Relationship between cell density and *in vivo* chlorophyll fluorescence of *Akashiwo sanguinea*.

수온과 염분에 따른 성장 실험은 수온 10, 15, 20, 25, 30℃의 5단계, 염분 10, 15, 20, 25, 30, 35 psu의 6단계를 조합하여 총 30단계의 조건하에서 실시하였다. 실험에 사용된 해수는 동해 외양수로 염분이 33 psu이기 때문에 10~30 psu의 염분은 초순수를 사용하여 희석하였으며, 35 psu는 자연 증발시켜 조절하였다. 수온 20℃, 염분 30 psu 그리고 300 μmol m^{-2} s^{-1}에 전배양(pre-culture)한 대수성장기 세포를 25 psu와 35 psu의 배지에 이식하여 배양하였다. 그리고 25 psu 배지의 세포가 대수성장기 후기에 있을 때 20 psu로 이식하여 염분변화에 따른 영향을 최대한 줄였다. 수온은 하루에 1℃씩 증감시켜 각각의 온도단계에 도달하도록 하였다. 이후 배양튜브에 f/2 배지를 5 ml를 주입한 후, 각각의 조건에 적응된 세포를 약 100 cells ml^{-1}이 되도록 접종하였다. 그 후 이틀간격으로 같은 시간에 *in vivo* chlorophyll 형광값을 측정하였으며, 성장속도(specific growth rate; μ)는 대수성장(exponential growth)을 보이는 기간 동안의 세포밀도를 이용하여 다음 식(1)에 의해 계산하였다.

$$\mu = \frac{1}{\Delta t} ln \frac{N_t}{N_0} \qquad (1)$$

N_0, N_t: 대수성장기에서 초기와 t시간 후의 세포밀도 (cells ml^{-1})

Δt: 대수성장기의 기간(day)

2.3 광 조건에 따른 성장속도 변화

광량에 따른 성장속도를 알아보기 위해 먼저 각각의 세포를 최적수온과 염분에 상응하는 조건(20℃, 30 psu)으로 광량은 약 300 μmol m^{-2} s^{-1}(12L:12D; cool-white fluorescent lamp)의 조건에서 유지 배양을 하여, 대수성장기까지 성장시킨 세포를 이용하였다. 이후 개량형 f/2배지(Guillard and Ryther, 1962)를 배양튜브에 주입한 후 최종 세포밀도가 약 100 cells ml^{-1}이 되도록 접종하였다. 광 조건은 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300 μmol m^{-2} s^{-1}(QSL-2100, Biospherical Instruments Inc., San Diego, CA. USA)의 총 9단계로 설정 하였으며, 이틀 간격으로 매일 같은 시간(오전 10:00)에 *in vivo* chlorophyll 형광값을 측정하였다. 성장속도는 대수성장을 보이는 기간 동안의 세포밀도를 이용하여 식(1)에 의해 계산하였다.

광 조건 실험은 triplicate로 수행하였으며, 성장속도는 이 값들의 평균값으로 나타냈다. 성장속도와 광량의 관계는 Lederman and Tett(1981)의 모델을 개량한 다음 식(2)을 이용하여 계산하였다.

$$\mu = \mu_m \frac{I - I_0}{(K_I - I_0) + (I - I_0)} \qquad (2)$$

μ: 성장속도(specific growth rate; day^{-1})

μ_m: 최대성장속도(maximum specific growth rate; day^{-1})

I: 광량(irradiance; μmol m^{-2} s^{-1})

I_0: 보상광량(compensation photon flux density(PFD); μmol m^{-2} s^{-1})

K_I: 반포화광량(half-saturation light intensity; μmol m^{-2} s^{-1})

3. 결과 및 고찰

3.1 수온과 염분변화에 따른 성장속도 변화

수온과 염분변화에 따른 *A. sanguinea*의 세포밀도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. *A. sanguinea*는 모든 염분 조건의 25℃에서는 뚜렷한 세포밀도의 변화를 보였으며, 25~35 psu의 20℃에서도 세포밀도의 변화를 보였다. 하지만 모든 염분조건의 낮은 온도(10~15℃)에서는 세포밀도가 감소하였다.

*A. sanguinea*의 수온과 염분에 대한 성장속도를 contour plotting으로 표현한 결과, 수온과 염분이 증가할수록 성장속도가 증가하였으며, 수온 25℃, 30 psu에서 0.28 day^{-1}로 최대성장속도를 보였다(Fig. 4). 또한 최적 성장조건(optimum growth condition, 최대성장속도의 80 % 이내 구간)은 수온 25℃와 염분 15~35 psu로, 매우 협온성이며, 광염성의 특징을 가진 것으로 나타났다.

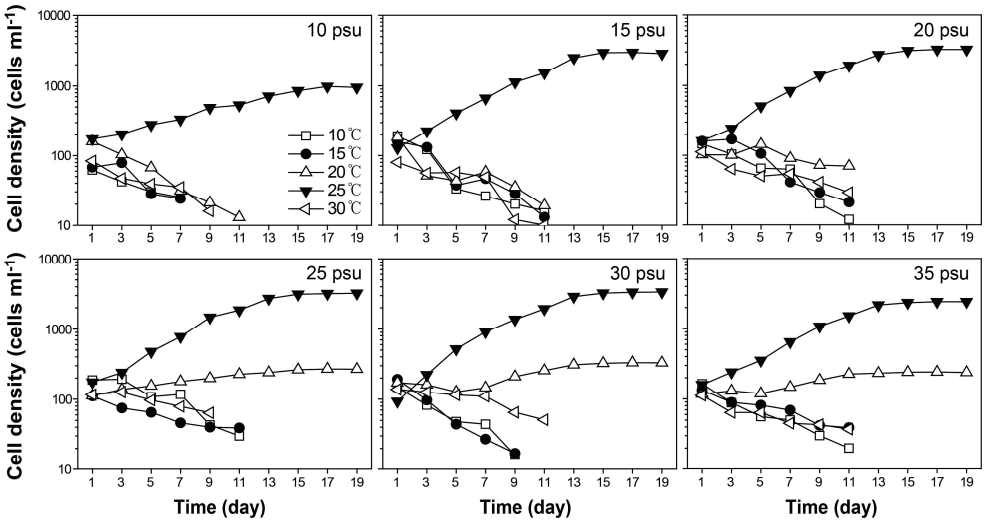

Fig. 3. Growth curves of *Akashiwo sanguinea* grown at various water temperature and salinity combinations. Each symbol represents the average of triplicate data.

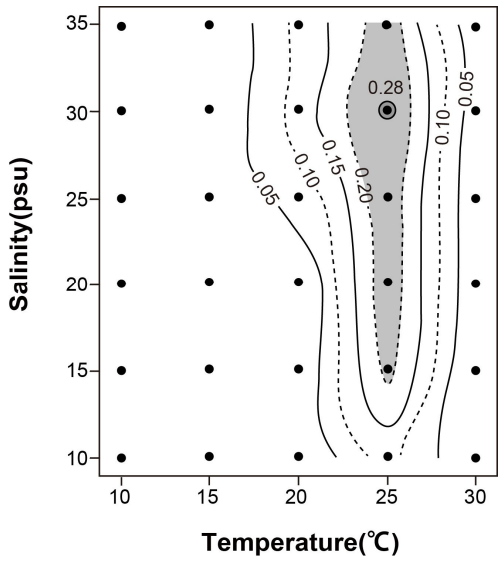

Fig. 4. Contour plot of specific growth rate(day^{-1}) of *Akashiwo sanguinea* at various water temperature and salinity combinations.

본 연구의 자란만에서 분리된 *A. sanguinea*와 서로 다른 환경에서 분리된 유해편모조류들의 최대성장을 보이는 수온과 염분 조건을 비교해 보면(Table 1), *A. sanguinea*는 *Alxandrium catenella*, *C. polykrikoides*, *Gymnodinium catenatum*, *Gyrodinium instriatum*과는 최대성장에 대한 수온과 염분의 영향이 매우 유사한 것으로 나타났다. 반면에 *Karenia mikimotoi*와 *Chattonella marina*에 비해서는 높은 염분, *A. tamarense*에 비해서는 높은 수온에서 최대성장을 보였다. 일본의 Hakata 만에서 분리된 *A. sanguinea*의 경우는 본 연구의 자란만에서 분리된 *A. sanguinea*에 비해서 수온조건은 유사하나 낮은 염분 조건인 20 psu에서 0.78 day^{-1}로 최대성장속도가 관찰되어 다소 상이한 결과를 보였다. 뿐만 아니라 통영에서 분리된 *A. sanguinea*는 본 연구의 분리주와 유사한 성장속도와 염분조건을 보였지만 수온조건은 낮았으며, 장목만에서 분리된 *A. sanguinea*는 성장속도는 높고, 수온조건은 다소 낮았다. Gallagher(1982)는 동일종이라도 분리된 해역이 지리적으로 다르면 다른 생리학적 특징을 나타낸다고 하였으며, Lee and Shim(1995) 역시 종 수준에서 동일한 분류군에 속하더라도 서로 다른 지역에서 분리된 종의 경우 다른 생리·생태적 특성을 가진다고 보고하였다. 따라서 *A. sanguinea*의 경우 같은 종일지라도 서로 다른 환경에 적응을 하고 있어, 그에 따른 생리적인 특성도 차이를 보이는 것으로 생각된다.

*A. sanguinea*는 연안에서 유영세포가 2월~11월까지 거의 연중 출현하는 것으로 알려져 있으며, 특히 4월~8월 사이에 출현률이 상대적으로 높았고, 적조가 발생한 시기는 대체적으로 5월~10월로 보고되었다(Lee et al., 2005). 또한 1999년~ 2000년의 1월~12월 사이에 총 46건의 *A. sanguinea* 적조가 발생하였는데, 이 중 16℃ 이상인 5월~10월에 90 % 이상이 발생함으로써, 이 종이 비교적 고수온기에 출현하는 것으로 보고되었다(Lee et al., 2005). 하지만 국립수산과학원에서 발표한 2002년~2011년도까지 한국 연안에서 *A. sanguinea*의 적조발생시기와 발생건수를 보면(Table 2), 발생시기의 염분 조건을 나타나 있지 않지만, 수온 조건의 경우 *A. sanguinea*는 20℃이하의 낮은 수온에서도 출현하여, 본 연구와 상이한 결과를 보였다. 또한 출현시기의 수온조건과 세포밀도 사이에 뚜렷한 관계가 보이지 않았다.

Table 1. Summary of maximum growth rates and values of temperature and salinity that led to the maximum growth rate reported on dinoflagellates and raphidophytes

Species	Maximum growth rate(day^{-1})	Temperature (℃)	Salinity (psu)	References
Akashiwo sanguinea (Jaran Bay, Korea)	0.28	25	30	This study
Akashiwo sanguinea (Tongyoung, Korea)	0.26	16	30	Lee et al., 2005
Akashiwo sanguinea (Jangmok Bay, Korea)	0.54	20	-	Baek and Joo, 2012
Akashiwo sanguinea (Hakata Bay, Japan)	0.78	25	20	Matsubara et al., 2007
Alexandrium catenella (Masan Bay, Korea)	0.36	25	30	Oh et al., 2012
Alexandrium tamarense (Masan Bay, Korea)	0.31	15	30	Oh et al., 2012
Chattonella marina (Gamak Bay, Korea)	0.64	25	25	Noh et al., 2006
Cochlodinium polykrikoides (South sea, Korea)	0.35	25	30	Oh et al., 2010
Gymnodinium catenatum (Yeoshuhae Bay, Korea)	0.50	25	30	Oh and Yoon, 2004
Gyrodinium instriatum (Hakata Bay, Japan)	0.49	25	30	Nagasoe et al., 2006
Karenia mikimotoi (Suo-Nada, Japan)	0.70	25	25	Yamaguchi and Honjo, 1989

Table 2. Occurrences of the *Akashiwo sanguinea* blooms in Korean coastal water during 2002~2012. Temperature and cell density records at the time of the occurrence of *A. sanguinea* blooms (http://portal.nfrdi.re.kr/redtide)

Year	Area	Temperature (℃)	Cell density (cells ml^{-1})
2002. 08. 05	Tongyeong Punghwari	28.5	1,100~2,200
2004. 06. 10	Ulsan Bay, Onsan Bay	17.2~18.8	800~1,200
2004. 06. 14	Masan Bay Dotseom (Mixed red tide)	22.5	500
2004. 06. 18	Tongyeong Harbor	22	1,600~21,100
2004. 05. 20	Geoje Gujora	17.2	150~980
2004. 05. 21	Busan Yeongdo	12.0~16.8	300~500
2004. 07. 22	Tongyeong Bukshin Bay (Mixed red tide)	27.7	250~260
2004. 04. 29	Masan Bay, Jindong Bay	16.0~16.5	400~3,000
2006. 06. 07	Masan Bay	21.3	1,700~2,500
2006. 06. 07	Jinhae-Haengam Bay (Mixed red tide)	23.5	200~800
2006. 05. 17	Jinhae-Haengam Bay	14.2	10,000~13,000
2006. 05. 18	Masan Bay Dotseom (Mixed red tide)	17.5	300~350
2006. 05. 29	Masan Bay	19.7	<200
2006. 05. 29	Masan Bay	21	500~1,000
2006. 05. 30	Tongyeong Harbor	18.2	200~450
2007. 07. 24	Tongyeong Dosan Jeosan	22	280~500
2007. 12. 03	Geoje Dongbe Yulpo	13.5~13.6	970
2011. 05. 28	Jinhae Yongwon~Gadeokdo (Mixed red tide)	15.9~17.2	60~200
2011. 11. 04	Geoje Gohyeon~Dundeok Bay	18.7~19.5	500~2,000
2011. 10. 06	Geoje Gohyeon Bay	21.2	750~2,200
2011. 11. 08	Tongyeong Harbor~Hasan	18.4~18.9	1,000~3,000
2011. 11. 08	Gadeokdo westen side~Goseong	18.35~19.01	58~313
2011. 11. 10	Geoje Dundeok~Jangmok Bay	18.5~19.3	500~1,000
2011. 11. 21	Geoje Chincheondo~Geoje Bridge, Dundeok Geoje Bay~Geoje Bay, Yulpo Bay	15.94~16.73	310~1,850

한편, *A. sanguinea*에 의한 적조발생해역은 우리나라 남해안 일대 뿐만 아니라 중국, 일본, 미국, 멕시코 호주 남부 연안에서도 보고되고 있다(Horner et al., 1997; Domingos and Menezes, 1998; Gomez and Boicenco, 2004; Lu and Hodgkiss, 2004). 특히, 이 종에 의한 적조의 발생 시기는 주로 봄~가을철에 나타나고 있으며, 강 하구 등으로부터의 담수유입과 함께 영양염류가 다량 유입되는 연안역에서 표 · 저층간 혼합이 적고 성층이 안정화된 상태에서 광도가 비교적 높은 경우 많이 발생되며, 20 psu 내외의 저염분에서 적조발생빈도가 높은 것으로 알려져 있다(Robichaux et al., 1998). 우리나라의 경우도 강우 직후 육지로부터 다량의 영양염류와 담수의 유입이 비교적 많은 진동만, 마산만, 가덕도 등지의 연안 내측해역에서 적조발생빈도가 현저히 높게 나타났으며(Lee et al., 2005), 미국과 호주에서 이 종에 의한 적조발생 조건과도 유사한 경향을 보였다(Cannon, 1990; Robichaux et al., 1998). 따라서, 이 종에 의한 적조는 봄~가을철에 육수의 영향을 비교적 많이 받으면서 표 · 저층간 혼합이 적은 연안내측해역에서 주로 발생하는 것으로 생각된다. 하지만 연안역에서 연중 우점하여 출현하는 규조류에 비해서 낮은 성장속도를 보인 *A. sanguinea*가 현장에서 대발생한 기작을 수온과 염분의 조건 만으로 설명하기에는 많은 한계점이 있다. 미국의 Oregon 연안역에서는 가을철 규조류의 대발생 직후 안정된 수괴와 낮은 영양염 환경 하에서 *A. sanguinea*의 대발생이 나타나기도 하였다(Du et al., 2011). *A. sanguinea*는 연안역에서 우점하여 출현하는 *Chaetoceros*와 *Skeletonema*에 의한 타감작용(allelopathic effect)에 의해 성장이 억제되는 것으로 알려져 있으며(Matsubara et al., 2007), 규조류의 대증식 직후 규산염의 고갈로 인해서 종천이가 발생한 것으로 설명되었다. 또한 낮은 영양염에 대한 생리학적인 극복 방안으로, *A. sanguinea*는 주·야간 수직이동이 가능하기에 주간에는 표층에서 활발한 광합성으로 유기물을 생산하여 에너지를 축적하고, 야간에는 저층으로 내려가 영양염을 흡수하여 대사에 필요한 영양염을 공급 받을 수 있다(Du et al., 2011). 게다가 최근에는 *A. sanguinea*가 완전한 독립영양생물이 아닌 소형 식물플랑크톤과 섬모충류, 남조류까지 포식이 가능한 혼합영양생물로 밝혀져(Bockstahler and Coats, 1993; Jeong et al., 2005), 먹이의 종류 및 밀도 등도 중요한 변수로 작용할 것이다. 결론적으로, 현장에서 *A. sanguinea*의 적조는 수온과 염분 조건 이외에도 영양염이나 광량, 수괴혼합 등과 같은 여러 가지 환경요인에 의한 영향이 복합적으로 작용하는 것으로 보인다.

3.2 광 조건에 의한 성장속도 변화

*A. sanguinea*는 10~20 μmol m^{-2} s^{-1}의 광 조건에서는 성장하지 않았으며, 그 이상의 광 조건에서는 광량의 증가함에 따라 최대세포밀도가 증가하여, 본 연구의 최대광량인 300 μmol m^{-2} s^{-1}에서는 약 4×10^3 cells ml^{-1} 까지 증가하였다(Fig. 5). 성장속도의 경우는 30 μmol m^{-2} s^{-1}의 광량에서 0.06 day^{-1}로 가장 낮았으며, 그 이상의 광량에서는 광량에 따라 성장속도가 증가하여 300 μmol m^{-2} s^{-1}의 광량에서 0.24 day^{-1}로 가장 높았다(Fig. 6). 비선형 최소자승법에 의해 유도된 성장식은 $\mu=0.31(I-16.87)/(I+51.19)$로, μ_m는 0.31 day^{-1}, I_0는 16.87 μmol m^{-2} s^{-1}, K_I는 84.93 μmol m^{-2} s^{-1}로 나타났다(Fig. 6). 이러한 결과를 다양한 환경에서 분리된 식물플랑크톤의 광 특성과 비교하여 보면(Table 3), K_I 값은 일본의 Hakata 만에서 분리된 *A. sanguinea*에 비해서는 다소 낮았지만, 그 외의 규조류와 편모조류에 비해서는 높은 값을 보였다. I_0 값에 대해서는 *A. catenella*에 비해서는 낮은 값을 보였으며, 그 외의 편모조류와 유사한 값을 보였다. 하지만, 규조류 *Skeletonema costatum*를 비롯하여 *Eucamphia zodiacus*와 *Coscinodiscus wailesii*에 비해서는 높은 값을 보였다. 따라서 자란만의 *A. sanguinea*는 연안역에서 연중 우점하여 출현하며, 잠재적인 종 경쟁관계에 위치하는 규조류에 비해서는 높은 광이 요구되는 것으로 판단된다.

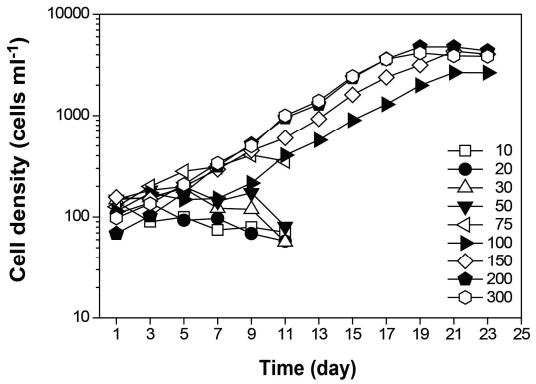

Fig. 5. Growth curve of *Akashiwo sanguinea* grown at various light intensites.

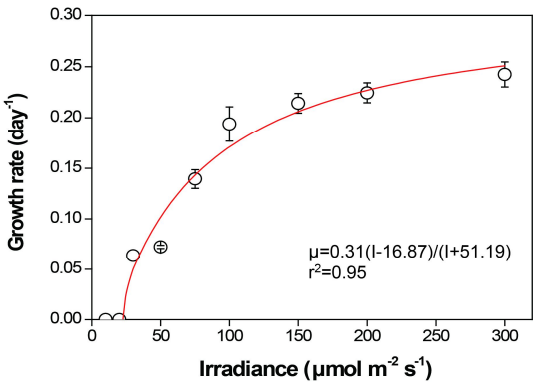

Fig. 6. Specific growth rate of *Akashiwo sanguinea* as function of light intensities.

Table 3. The comparison of half-saturation light intensity (K_I) and compensation photon flux density (I_0) for *Akashiwo sanguinea* and other phytoplankton from various environments

Species	K_I ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	I_0	References
Akashiwo sanguinea (Jaran Bay, Korea)	84.9	16.9	This study
Akashiwo sanguinea (Hakata Bay, Japan)	114	14.4	Matsubara et al., 2007
Alexandrium tamarense (Masan Bay, Korea)	44.5	20.7	Park, 2013
Alexandrium catenella (Masan Bay, Korea)	59.5	40.8	Park, 2013
Cochlodinium polykrikoides (South sea, Korea)	53.2	15.3	Oh et al., 2010
Gymnodinium catenatum (Yeosuhae Bay, Korea)	42.6	10.4	Oh and Yoon, 2004
Coscinodiscus wailesii (Harima-Nada, Japan)	52.0	5.69	Nishikawa and Yamaguchi, 2008
Eucamphia zodiacus (Harima-Nada, Japan)	49.9	5.04	Nishikawa and Yamaguchi, 2006
Skeletonema costatum (Jinhae Bay, Korea)	31	1.0	Oh et al., 2008

식물플랑크톤의 빛의 이용능력은 서식수심을 결정하는 중요한 요인이다. 따라서 *A. sanguinea*의 I_0 값을 바탕으로 자란만에서 이 종이 성장에 있어 가장 적합한 하계를 기준으로 서식수심을 예측해 보았다. *A. sanguinea*의 I_0에 해당하는 수심을 Lambert-Beer 식($Iz=I_0e^{-kz}$, Iz는 수심 z에서의 광량, I_0는 해수면에서 광량, z는 수심, k는 빛의 소산계수)에 대입하여 간접적으로 계산할 수 있다. 이때 소산계수는 국가해양환경정보통합시스템(http://www.meis.go.kr)에서 제공되는 해양환경측정망 자료 중 자란만의 투명도(평균 4.9 m)를 이용하여 계산하였다(k=1.7/z; k는 소산계수, z는 투명도 수심). 또한 표층광량은 기상청에서 발표한 기상월보 중 자란만과 가장 가까운 진주 지상기상관측지점의 2013년 8월의 일별 수평면 일사량을 이용하였다(http://www.kma.go.kr). 수평면 일사량 단위는 $MJ\ m^{-2}$이기에 본 연구에서 사용한 광량자 단위로 환산할 필요가 있다. 광합성에 이용하는 약 400~700 nm의 파장에서 일사량과 광량자 사이에 $1\ \mu mol\ m^{-2}\ s^{-1} = 0.2\ J\ m^{-2}\ s^{-1}$(Nishikawa and Yamaguchi, 2006)의 관계가 있어 환산이 가능하다. 또한 해수면에 입사광은 반사 등에 따라 15 %가 손실하고 나머지 50 %가 광합성 유효파장으로 해수면에 입사한다고 가정하였으며(Nishikawa, 2002), 이때 표층광량은 약 $553\ \mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$로 계산되었다. 상기에 서술된 방식으로 *A. sanguinea*의 I_0에 해당하는 수심은 약 10 m로 계산되어 진다. 이 수심은 자란만의 저층에 해당하는 수심으로 *A. sanguinea*의 광 이용성만 고려한다면 자란만에서 저층까지 유영세포가 발견될 수 있을 것으로 보인다. 특히, 앞서 서술된 바와 같이 *A. sanguinea*는 *C. polykrikoides*, *G. catenatum*, *A. tamarense*등과 같이 빛과 영양염의 효율적 이용을 위해 주·야 수직이동이 가능하다(Baba et al., 2001; Park et al., 2001; Park et al., 2002; Lewis et al., 2006). 따라서 *A. sanguinea*는 유영능력을 바탕으로 야간에는 하강하여 저층에서 풍부한 영양염을 흡수하고, 주간에는 상승하여 성장 가능 수심 내에서 효율적인 광 이용이 가능할 것으로 생각된다.

4. 결 론

와편모조류 *Akashiwo sanguinea*는 현재 우리나라에서 유해·유독한 적조생물로 알려져 있지는 않지만, 고밀도로 발생할 경우 어패류의 질식사와 2차적인 빈산소 수괴를 형성하여 해양생태계에 막대한 피해를 입힐 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 2000년대에 이 종에 의한 적조는 주로 남해안에서 주로 나타나고 있으며 울산연안의 내만역에서도 적조를 형성하여 광범위하게 출현하는 것으로 나타났다. 하지만 출현시기의 수온범위를 살펴보면 뚜렷한 패턴을 보이지 않아, 본 종에 대한 기초적인 생리·생태학적 특징을 파악할 필요가 있기에, 자란만에서 분리된 *A. sanguinea*의 성장에 영향을 미치는 수온, 염분 및 광조건의 특성을 파악하였다. *A. sanguinea*의 최대성장속도는 수온 25℃, 염분 30 psu로 나타났으며, 최적성장범위(최대성장속도의 80 % 이내 구간)는 수온 25℃의 염분 15~35 psu로 나타났다. 또한 성장과 광량의 관계로 부터 I_0 값은 $16.87\ \mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, K_I 값은 $84.93\ \mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$로 나타났다. 결과적으로 자란만에서 분리한 *A. sanguinea*의 성장에 대한 수온, 염분, 광 조건만을 고려한다면, 비교적 낮은 광 조건에서 성장이 가능하며, 고온을 선호하는 협온성 그리고 넓은 염분범위에서 성장이 가능한 광염성의 종으로 판

단되었다. 따라서 이러한 생리특성은 하계에 충분한 광조건, 높은 수온을 보이며, 염분의 변동 폭이 큰 자란만과 같은 연안해역에서 충분히 우점 할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 앞으로 *A. sanguinea*의 무기 및 유기영양염에 대한 흡수 및 성장동력학과 같은 추가적인 생리학적 특성 규명과 동시에 현장 자료와의 상호 비교를 통하여 *A. sanguinea*의 확대 메커니즘을 밝히는 연구가 필요할 것이다.

References

[1] Baek, S. H. and H. M. Joo(2012), Relationships between cell bio-volume and growth rate of dominant red tide organisms in the coastal water, Journal of the Korean Environment Biology, Vol. 30, No. 1, pp. 1-8.

[2] Baba, T., S. Hiyama and T. Tainaka(2001), Vertical migration of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* and toxicity of cultures oyster in Senzaki Bay, Yamaguchi Prefecture, Bulletin Plankton Society of Japan, Vol. 48, No. 2, pp. 95-99.

[3] Bockstahler, K. R. and D. W. Coats(1993), Grazing of the mixotrophic dinoflagellate *Gymnodinium sanguineum* on ciliate population of Chesapeake Bay, Marine Biology, Vol. 116, No. 3, pp. 447-487.

[4] Botes, L., A. J. Smit and P. A. Cook(2002), The potential threat of algal blooms to the abalone (*Haliotis midae*) mariculture industry situated around the South African coast, Harmful Algae, Vol. 2, No. 4, pp. 247-259.

[5] Brand, L. E., R. R. L. Guillard and L. S. Murphy(1981), A method for the rapid and precise determination of acclimated phytoplankton reproduction rates, Journal Plankton Research, Vol. 3, No. 2, pp. 193-201.

[6] Cannon, J. A.(1990), Development and dispersal of red tides in the Port River, South Australia, In: Toxic Marine Phytoplankton, (eds.) Graneli, E. B. Sundstroem, L. Edler and D. M. Anderson, pp. 110-115.

[7] Daugbjerg, N., G. Hansen, J. Larsen and ∅. Moestrup(2000), Phylogeny of some of the major genera of dinoflagellates based on ultrastructure and partial LSU rDNA sequence data, including the erection of three new genera of unarmoured dinoflagellates, Phycologia, Vol. 39, No. 4, pp. 302-317.

[8] Domingos, P. and M. Menezes(1998), Taxonomic remarks on planktonic phytoflagellates in a hypertrophic tropical lagoon (Brazil). Hydrobiologia, Vol. 369, pp. 297-313.

[9] Du, X., W. Peterson, A. McCulloch and G. Liu(2011), An unusual bloom of the dinoflagellate *Akashiwo sanguinea* off the contral Oregon, USA, coast in autumn 2009, Harmful Algae, Vol. 10, pp. 784-793.

[10] Gallagher, J. C.(1982), Physiological variation and electrophoretic banding patterns of genetically different seasonal populations of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae), Journal of Phycology, Vol. 18, No. 1, pp. 148-162.

[11] Gomez, F. and F. Boicenco(2004), An annotated checklist of dinoflagellates in the Black Sea. Hydrobiologia, Vol. 517, pp. 43-59.

[12] Guillard, R. R. L. and J. H. Ryther(1962), Studies of marine planktonic diatoms *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula conjervaces* (Cleve) Gran, Canadian Journal Mircobiology, Vol. 8, No, 2, pp. 223-239.

[13] Guillard, R. R. L.(1995), Culture methods, In: Hallegraeff, G. M., D. M. Anderson and A. D. Cembella, Manual on Harmful Marine Microalgae, UNESCO, New York, pp. 45-62.

[14] Horner, R. A., D. L. Garrison and F. G. Plumley(1997), Harmful algal blooms and red tide problems on the U.S. west coast. Limnology and Oceanography, Vol. 42, No. 5, pp. 1076-1088.

[15] Jeong, H. J., J. Y. Park, J. H. Nho, M. O. Park, J. H. Ha, K. A. Seong, C. Jeng, C. N. Seong, K. Y. Lee and W. H. Yih(2005), Feeding by red-tide dinoflagellates on the cyanobacterium *Synechococcus*, Aquatic Microbial Ecology, Vol. 41, No. 2, pp. 131-143.

[16] Ki, J. S. and M. S. Han(2006), A low-density oligonucleotide array study for parallel detection of harmful algal species using hybridization of consensus PCR products of LSU rDNA D2 domain, Biosensors and Bioelectronics, Vol. 21, pp. 1812-1821.

[17] Kim, H. G.(2005), Harmful Algal Blooms in the Sea, Dasom Publishing Co., Seoul, p. 467.

[18] Lederman, T. C. and P. Tett(1981), Problems in modelling the photosynthesis-light relationship for phytoplankton, Botanica Marina, Vol. 24, No. 3, pp. 125-134.

[19] Lee, C. K., O. H. Lee and S. G. Lee(2005), Impacts of temperature, salinity and irradiance on the growth of ten harmful algal bloom-forming microalgae isolated in Korean coastal waters, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 10, No. 1, pp. 79-91.

[20] 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.

[21] Lee, W. H. and J. H. Shim(1995), Intraspecific variation in the light intensity niche component of the diatom *Skeletonema costatum* form Korean coastal waters, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 30, No. 5, pp. 436-441.

[22] Lee, Y. S, Y. B. Kim and H. G. Han(2012), Water quality of ground seawater and trigger elements for a *Cochlodinium polykrikoides* red tide, Journal of the Environmental Sciences, Vol. 21, No. 9, pp. 1079-1085.

[23] Lewis, N. I., W. Xu, S. K. Jericho, H. J. Kreuzer, M. H. Jericho and A. D. Cembella(2006), Swimming speed of three species of *Alexandrium* (Dinophyceae) as determined by digital in-line holography, Phycologia, Vol. 45, No. 1, pp. 61-70.

[24] Lu, S. H. and I. J. Hodgkiss(2004) Harmful algal bloom causative collected from Hong Kong waters. Hydrobiologia, Vol. 512, pp. 231-238.

[25] Matsubara, T., S. Nagasoe, Y. Yamasaki, T. Shikata, Y. Shimasaki, Y. Oshima and T. Honjo(2007), Effects of temperature, salinity, and irradiance on the growth of the dinoflagellate *Akashiwo sanguinea*, Journal of Experimental Marine Biology and Ecolology, Vol. 342, pp. 226-230.

[26] Nagasoe, S., D. I. Kim, Y. Shimasaki, Y. Oshima, M. Yamaguchi and T. Honjo(2006), Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the red tide dinoflagellate *Gyrodinium instriatum* Freudenthal et Lee, Harmful Algae, Vol. 5, No. 1, pp. 20-25.

[27] NFRDA(1998), National Fisheries Research and Development Agency, Harmful algal blooms in Korean coastal waters in 1997, p. 147.

[28] NFRDA(2000), National Fisheries Research and Development Agency, Harmful algal blooms in Korean coastal waters in 1999, p. 206.

[29] NFRDI(2002), National Fisheries Research and Development Institute, Harmful algal blooms in Korean coastal waters in 2000～2001, p. 158.

[30] Nishikawa, T.(2002), Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the diatom *Eucampia zodiacus* caused bleaching seaweed *Porphyra* isolated from Harima-Nada, Seto Inland Sea, Japan. Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 68, No. 3, pp. 356-361.

[31] Nishikawa, T. and M. Yamaguchi(2006), Effect of temperature on light-limited growth of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenverg, a causative organism in the discoloration of *Porphyra thalli*, Harmful Algae, Vol. 5, 141-147.

[32] Nishikawa, T. and M. Yamaguchi(2008), Effect of temperature on light-limited growth of the harmful diatom *Coscinodiscus wailesii*, a causative organism in the bleaching of aquacultured *Porphyra thalli*, Harmful Algae, Vol. 7, pp. 561-566.

[33] Noh, I. H., Y. H. Yang, D. I. Kim and S. J. Oh(2006), Effects of water temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful algae *Chattonella marina* (Subrahmanyn) Hara et (Raphidophyceae) isolated from Gamak Bay, Korea, Journal of the Korean Fisheries Sciences, Vol. 39, No. 6, pp. 487-494.

[34] Oh, S. J. and Y. H. Yoon(2004), Effects of water temperature and salinity and irradiance on the growth of the toxic dinoflagellate, *Gymnodinium catenatum* (Graham) isolated from Yeosuhae Bay, Algae, Vol. 19, No. 4, pp. 293-301.

[35] Oh, S. J., I. S. Kang, Y. H. Yoon and H. S. Yang(2008), Optical characteristic on the growth of centric diatom *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve isolated from Jinhae Bay in Korea. Korean Journal of Environmental Biology, Vol. 26, No. 2, pp. 57-65.

[36] Oh, S. J., C. H. Kim, H. K. Kwon and H. S. Han(2010), Effects of water temperature, salinity and irradiance on the growth of harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margelef isolated from South sea of Korea in 2008, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 43, No. 6, pp. 715-722.

[37] Oh, S. J., J. A. Park, H. K. Kwon, H. S. Yang and W. A. Lim(2012), Ecophysiological studies on the population dynamics of two toxic dinoflagellates *Alexandrium tamarense* and *Alexandrium catenella* isolated from the southern coast of Korea I. Effects of temperature and salinity on the growth, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 133-141.

[38] Okaichi, T.(2003), Red Tides, Terra Scientific Publishing Co., Tokyo, p. 439.

[39] Park, J. G., M. K. Jeong, J. A. Lee, K. J. Cho and O. S. Kwon(2001), Diurual 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.

[40] Park, M. G., S. K. Cooney, J. S. Kim and D. W. Coats(2002), Effects of parasitism on diel vertical migration, phototaxis/geotaxis, and swimming speed of the

bloom-forming dinoflagellate *Akashiwo sanguinea*. Aquatic Microbial Ecology, Vol. 29, No. 1, pp. 11-18.

[41] Park, T. G., Y. S. Kang, M. K. Seo, C. H. Kim and Y. T. Park(2008), Rapid detection and quantification of fish killing dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae) in environmental samples using Real-time PCR, Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 11, No. 4, pp. 205-208.

[42] Park, J. A.(2013). DON utilization of toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* and *Alexandrium catenella* isolated from Masan Bay, M. Sc. Dissertation, Pukyung National University, Busan, Korea. p. 92.

[43] Robichaux, R. J., Q. Dortch and J. H. Wrenn(1998), Occurrence of *Gymnodinium sanuineum* in Louisiana and Texas coastal waters, 1989-1994, NOAA Technical report NMFS, Vol. 143, pp. 19-26.

[44] Yamaguchi, M. and T. Honjo(1989), Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the noxious red tide flagellate *Gymnodinium nagasakiense* (Dinophyceae). Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, Vol. 55, No. 11, pp. 2029-2036.

원고접수일 : 2013년 10월 04일
원고수정일 : 2013년 11월 19일 (1차)
2013년 11월 27일 (2차)
게재확정일 : 2014년 02월 25일