

실내 배양시 부착기질 크기에 따른 저서성 미세조류 *Nitzschia* sp.의 성장 특성

오석진¹ · 윤양호^{2,†} · 山本 民次³ · 양한섭¹

¹부경대학교 해양과학공동연구소

²전남대학교 수산해양대학 해양기술학부

³히로시마대학 대학원 생물권과학연구과

Effect of Attachment Substrate Size on the Growth of a Benthic Microalgae *Nitzschia* sp. in Culture Condition

Seok Jin OH¹, Yang Ho Yoon^{2,†}, Tamiji Yamamoto³ and Han-Soeb Yang¹

¹Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University, Daeyeon-dong, Nam-gu,
Busan 608-737, Korea

²Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, San 96-1, Dundeok-dong, Yeosu 550-749, Korea

³Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, 739-8528, Japan

요 약

저서성 미세조류의 성장에 미치는 부착기질의 영향을 알기 위해 서로 다른 크기의 glass bead를 첨가하여 저서성 미세조류 *Nitzschia* sp.(진해만 클론)의 성장을 조사하였다. 연구에 사용된 glass bead의 크기는 0.09-0.15 mm(G1), 0.25-0.50 mm(G2), 0.75-1.00 mm(G3) 그리고 1.25-1.65 mm(G4)이며, glass bead를 첨가하지 않는 대조구도 설정하였다. *Nitzschia* sp.의 가장 높은 성장속도(0.37/day)와 최대세포밀도(9,232±840 cells/mL)는 가장 작은 크기의 glass bead를 첨가한 G1에서 나타났다. 그리고 성장속도와 최대세포밀도는 glass bead 크기의 증가와 함께 감소하였다(G4의 성장속도와 최대세포밀도는 각각 0.24/day와 6,397±524 cells/mL였다). 더욱이 대조구의 성장속도는 실험구 G1에서 G3의 성장속도보다 상당히 낮았다. 이 결과에서 *Nitzschia* sp.와 같은 저서성 미세조류를 위한 부착기질은 성장속도 뿐만 아니라 세포밀도에도 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 부착미세조류의 생리실험을 위해서는 예비실험으로 부착기질의 유무 및 대상 종에 적합한 부착입자의 크기의 고려가 필요할 것으로 보인다.

Abstract – To understand the effect of attachment substrate on the growth of benthic microalgae, we experimentally investigated the growth of benthic microalgae *Nitzschia* sp. (Jinhae Bay strain) with additions of glass beads in different sizes. The glass beads used in this study are 0.09-0.15 mm (G1), 0.25-0.50 mm (G2), 0.75-1.00 mm (G3) and 1.25-1.65 mm (G4). No addition of glass beads used as controls. Highest specific growth rate (0.37/day) and maximum cell density (9,232±840 cells/mL) of *Nitzschia* sp. showed at the smallest glass beads (G1), and the specific growth rate and maximum cell density were decreasing with increasing size of glass beads (specific growth rate and maximum cell density of G4 was 0.24/day and 6,397±524 cells/mL, respectively). Moreover, specific growth rate of the control experiment (0.23/day) was significantly lower than their of G1 to G3 experiment. The results indicated that the attachment substrate for benthic microalgae as *Nitzschia* sp. is important factor which affecting the growth rate as well as cell density. Therefore, the physiological experiment of benthic microalgae seems to be necessary to preliminary experiment, which is addition or not of the attachment suitable substrate and the grain size for the target species of benthic microalgae.

Keywords: benthic microalgae(저서성 미세조류), *Nitzschia* sp., specific growth rate(성장속도), maximum cell density(최대세포밀도), attachment substrate(부착기질), grain size(기질크기)

[†]Corresponding author: yoonyh@chonnam.ac.kr

1. 서 론

연안해역의 퇴적물 표층에 서식하는 저서성 미세조류는 부유성 미세조류에 비교하여 약한 조도에 적응되어 있으며(Yamamoto *et al.*[2004]; Oh *et al.*[2007]), 영양염을 많이 요구하는 것으로 알려져 있다(Oh[2008]). 이러한 생리적인 특성은 일부 연구자들에 의해 오탁된 수질 및 퇴적층의 환경 개선하고 연안역 생태계 보존을 위한 친환경적 환경개선 방안의 한 도구로서 제안되어 왔다(Fukami *et al.*[2002]; Ruangdej and Fukami[2004]; Yamamoto *et al.*[2004]; Oh *et al.*[2008]). 저서 미세조류를 이용한 오탁된 수질 및 퇴적층의 환경개선에 대한 기본 개념은 부영양화 및 빈산소수괴가 형성되는 오탁된 환원성 퇴적층에 저서성 미세조류를 살포하여 그들의 광합성에 의해 산화환경으로 개선시키는 것이다. 하지만 우리나라 내만역의 경우 대규모 입해단지 조성으로 영양염이 충분히 존재하는 환경임에도 불구하고 부유물질에 따른 광량 제한이 기초생산에 큰 영향을 주고 있다(Kim and Ki[1987]; Yoon[2000]). 이러한 환경의 저질을 개선하기 위해 저층에 빛을 조사(照射)하여 저서성 미세조류의 광합성을 촉진함으로써 저층환경을 개선하는 방법이 고려되고 있다(Fukami *et al.*[2002]; Ruangdej and Fukami[2004]). 더욱이 이를 발전시켜 광 파장에 따른 미세조류 성장 특이성을 이용하여 특정 파장을 조사함으로써 빈산소화 문제를 해결하기 위한 연구도 수행되고 있다(Oh *et al.*[2007]; Oh[2008]). 따라서 저서미세조류는 생태학적인 측면뿐만 아니라 친환경 복원측면에서도 중요한 생물이다. 하지만 부유성 미세조류의 생리실험은 수온, 염분 및 조도에 따른 성장 특이성 그리고 영양염의 흡수 동력학 실험 등과 같이 다수 수행되어 있으나, 저서성 미세조류에 관해서는 대부분이 현장관측 수준에 머물러 있다.

한편 저서성 미세조류의 대부분을 차지하는 부착성 저서 규조류는 세포로부터 점액질을 분비하여 저질의 입자 등과 같은 기질에 부착하여 성장을 하게 되는데, 부착기질은 수온, 염분, 영양염 등과 같은 환경적인 요인과 더불어 저서성 규조류의 성장에 중요한 요인이 된다(Kawamura[2004]). 또한, 부착기질의 크기는 저질의 광투과성 및 운동성 등에 제약을 주기 때문에 저서성 규조류의 분포 및 생물량을 조절하는 중요한 요인으로 지목하고 있으며(Watermann *et al.*[1999]), 교란과 같은 물리적인 요인 및 영양염의 공급과 같은 화학적인 요인까지 영향을 주게 된다(McIntyre *et al.*[1996]).

따라서 본 연구는 부착용 기질의 유무와 입자크기에 따라 저서성 미세조류의 성장특성을 파악하고 부착기질의 중요성을 고찰하여 앞으로의 저서성 미세조류의 생리실험 설계에 기본적인 기초 지식을 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

저서미세조류 중 연안해역에서 쉽게 관찰되는 *Nitzschia sp.* (KJH200707)를 진해만 서쪽 연안(35°06'9.43N, 128°47'24.93E)에

서 채기한 저층퇴적물(수심 2.5 m)로부터 pasteur pipette(ca. ϕ 50-100 μ m)를 이용하여 분리하였다. 분리된 세포는 여과해수(0.22 μ m pore size, Millipore GSWP)에 4-회 세척한 후 유리재질의 배양 튜브(TB-2800, Japan)에 이식하였다. 배지는 남해 육지도 부근 해수를 바탕으로 한 f/2+Si(Guillard and Ryther[1962])로 selenium (H_2SeO_3)을 최종농도가 0.001 μ M 되게 첨가하였다. 또한 저서미세조류 *Nitzschia sp.*는 부유성 미세조류보다 영양염 요구량이 높은 것으로 알려져 있기 때문에(Oh[2008]), 채기한 표층퇴적물에서 추출한 토양 추출액(soils extraction)을 f/2+Si 배지 1 L에 1 mL 첨가하였다. 토양 추출액은 채기한 표층퇴적물의 중량만큼 이온교환수를 첨가하고 감압멸균(121 °C, 30분)후 여과과정을 거쳐 조제하였다. 배양조건은 본 연구에 사용한 클론과 다르지만 일본 Hiroshima만에서 분리한 *Nitzschia sp.*에서 최대 성장속도를 보였던 수온 15 °C, 염분 25 psu로(Yamamoto *et al.*[2004]), 광량은 Oh *et al.*[2007]이 보고한 최대성장속도가 보인 40 μ mol/m²/s(12L:12D; cool-white fluorescent lamp; FL400, Kum-Ho, Seoul, Korea)로 설정하였다.

본 연구에서 사용한 부착기질은 정밀 공업용으로 사용하는 glass bead(SiLibeads Type S, SiLi, Germany)로 형광광도계에서 직접 측정이 가능한 배양튜브(13×100 mm; 유리제품)에서 서로 다른 직경을 가진 glass bead를 첨가하였다. 이 때 첨가한 glass bead의 직경은 총 4 종류의 시판품을 사용하였으며(G1: 0.09-0.15 mm, G2: 0.25-0.50 mm, G3: 0.75-1.00 mm, G4: 1.25-1.65 mm; Table 1), glass bead의 첨가량은 배양튜브의 바닥에서 5 mm 정도가 되도록 첨가하였다. 대조구는 glass bead를 첨가하지 않은 대조구(R1)와 polypropylene 재질의 배양튜브(13×100 mm, FA2027, Falcon, USA)를 사용한 대조구(R2)로 설정하였다(Table 1). 배양액(f/2-Si)은 5 mL를 첨가하였으며, 세포밀도는 전 배양에서 대수성장기(exponential phase) 후기의 *Nitzschia sp.* 세포를 최종세포 밀도가 약 100 cells/mL가 되도록 조절하였다. 그리고 배양튜브의 캡은 통상 snap cap, screw cap 또는 sili stopper를 사용하지만, 본 연구에서는 보다 효율적인 통기성을 위해 bio filter(<0.02 μ m, Sun Bio-Filter, Sibata Japan)를 부착하여 외부로부터 생·화학적 오염을 방지 하였다. 모든 실험구는 triplication을 원칙으로 하였으며, 이 중 하나의 실험구가 다른 실험구에 비해 성장속도가 현격한 차이를 보일 경우, 이를 제외하고 평균값을 계산하였다.

세포의 성장속도를 구하기 위하여 세포수 측정은 현미경을 이용한 직접 검정이 아닌, *in vivo* chlorophyll 형광값과 세포수의 선형관계로 계산하였다. 이는 형광광도계에서 직접 측정이 가능한 배양튜브를 이용함으로써 세포밀도의 확인을 위한 배양튜브의 개폐가 없어 초기 배양상태로 계속 유지 할 수 있으며, 대량의 표본을 신속히 처리 할 수 있는 장점이 있다(Brand *et al.*[1981]). 형광값과 세포수간의 선형관계식을 구하기 위하여 *Nitzschia sp.* 세포를 수온 15, 염분 25 psu 그리고 광량 15 μ mol/m²/s(12L: 12D; cool-white fluorescent lamp; FL400, Kum-Ho, Korea)의 조건에서 세포밀도 약 1.0×10⁵ cells/mL까지 성장시킨 후 농축과 희석을 통해 여러

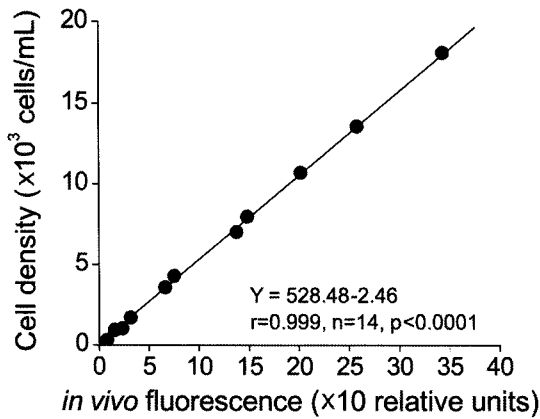


Fig. 1. Relationship between cell density and *in vivo* chlorophyll fluorescence of *Nitzschia* sp.

가지 세포밀도로 조제, 형광광도계(Model 10-AU-005, Turner Designs, USA)로 *in vivo* chlorophyll 형광값을 측정하였다. 세포수의 안정적인 형광값을 얻기 위해 약 5분 동안 암 조건에서 방치 후 측정하였다(Brand *et al.*[1981]). 그리고 현미경을 이용하여 측정된 세포수를 이용하여 세포밀도와 형광값의 관계를 구하였다(Fig. 1). 그 결과 *Nitzschia* sp.의 세포밀도와 *in vivo* chlorophyll 형광값 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립되었다(eq. 1).

$$(\text{cell density}) = 528.48 (\text{fluorescence}) - 2.46 \quad (r=0.999) \quad (1)$$

성장속도는 대수성장(exponential growth)을 보이는 기간 동안의 형광 값을 이용하여 다음 식 (2)에 의해 계산하였다.

$$\mu = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{N_t}{N_0} \quad (2)$$

N_0, N_t : 대수성장기에서 초기와 t 시간(day) 후의 세포수(cells/mL)

t : 대수성장기의 배양시간(day)

3. 결과 및 고찰

저서미세조류 *Nitzschia* sp.는 glass bead 크기에 따라 성장속도가 다르게 나타났는데(Fig. 2, Table 1), 크기가 클수록 성장속도는 낮아졌으며, 크기가 작아질수록 성장속도는 증가하였다. glass bead를 첨가하지 않았던 대조구인 R1과 R2는 0.23/day로 실험구 G4와 거의 유사한 성장속도를 보였다(0.24/day). 하지만 실험구 G4보다 작은 glass bead 실험구(G1-G3)의 성장속도 보다는 통계적으로 유의하게 낮았다(ANOVA의 Scheffe's test; Table 2). 또한 G1에서 G3까지 실험구는 ANOVA의 Scheffe's test 검증 결과 유의한 차이가 있는 것으로 나타나, glass bead 크기에 따라 성장속도가 달라짐을 알 수 있었다(Table 2).

한편 *in vivo* chlorophyll 형광 값과 세포밀도의 관계로부터 구하여진 각각의 실험구와 대조구의 세포밀도를 Fig. 2에, 최대세포밀도는 Table 1에 나타내었다. G1-G4 모두 대조구보다 높은 최대 세포밀도를 보였으며, 성장속도와 유사하게 glass bead 크기가 클

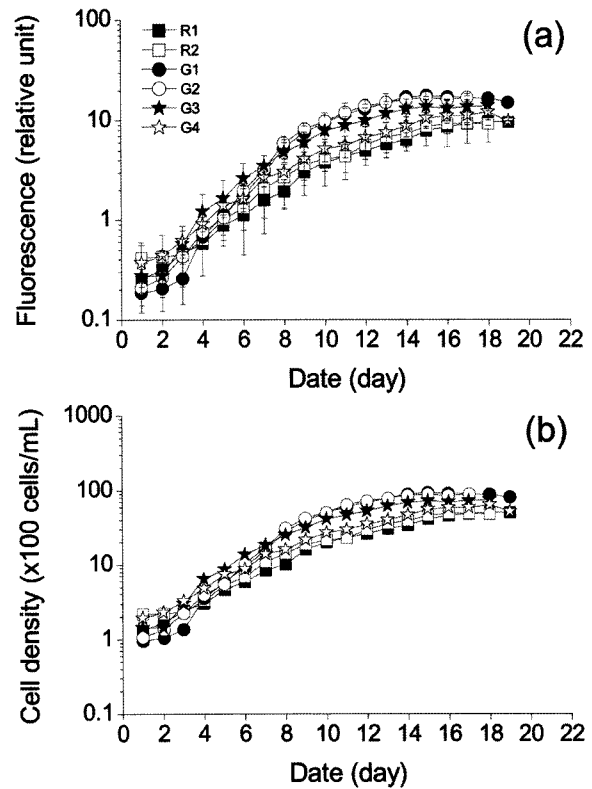


Fig. 2. (a) *in vivo* chlorophyll fluorescence values of *Nitzschia* sp. grown with glass beads in different size. (b) cell density calculated by regression equation, (cell density)=528.48 (fluorescence) - 2.46.

Table 1. Specific growth rate and maximum cell density with addition of glass beads in different size and controls. Maximum cell density is calculated by regression equation (cell density)=528.48 (fluorescence) - 2.46

	Specific growth rate (/day)	Maximum cell density (cells/mL)
G1 (0.09-0.15 mm)	0.37±0.01	9,232±840
G2 (0.25-0.50 mm)	0.34±0.02	8,849±81.0
G3 (0.75-1.00 mm)	0.27±0.01	7,436±334
G4 (1.25-1.65 mm)	0.24±0.01	6,397±524
R1*	0.23±0.01	5,108±457
R2**	0.23±0.01	4,943±38.0

*no glass beads

**culture tube with polypropylene without glass beads

Table 2. Probability by Scheffe's test of one-way ANOVA for specific growth rate (significantly level: <0.001)

	R1	R2	G1	G2	G3	G4
R1						
R2	0.392					
G1	<0.001	<0.001				
G2	<0.001	<0.001	0.028			
G3	<0.001	<0.001	<0.001	0.002		
G4	0.867	0.496	<0.001	<0.001	<0.001	

수록 최대세포밀도는 낮았고 작을수록 최대 세포밀도가 높아지는 경향이였다. 이는 glass bead 체적이 감소할수록 표면적이 증가하

여 보다 많은 세포가 부착하여 성장할 수 있기 때문에 판단되었다. 실험구 G4의 경우 대조구보다는 높은 최대세포밀도를 보였으나, 성장속도는 유사하였다. 이는 glass bead의 직경이 세포보다 크기 때문에 대조구 R1과 R2의 배양튜브의 벽과 같이 부착기질로 작용하지 않았을 가능성이 있다. 실제 현미경 관찰에서 대조구인 R1과 R2는 배양튜브 벽에 부착한 세포도 있었으나, 대부분이 세포끼리 부착하여 군체를 이루고 있었으며, 실험구 G4에서도 유사한 양상을 보였다. 본 연구에서는 시판용 glass bead를 사용하였기 때문에 실험구 G1 보다 작은 크기의 부착기질 실험은 수행하지 않았지만, 실험구 G1의 현미경 관찰에서 0.09-0.15 mm보다 작은 크기의 유리 파편에도 잘 부착되어 있는 것이 관찰되어 실험구 G1 보다 더 작은 크기에서도 부착기질로서 역할이 가능할 것으로 보인다. 따라서 저서미세조류 대량배양을 위해서는 수온, 염분 및 광 조건이 같더라도 부착기질의 첨가에 따라 약 2배 정도 배양효율을 높일 수 있을 것이다.

Watermann *et al.*[1999]는 여러 해역의 퇴적물을 이용하여 저서성 미세조류의 부착성 기질에 대한 영향을 실내실험을 통하여 고찰하였으며, 본 연구의 결과와 유사하게 펄질과 같은 세립질 퇴적물의 기질에서 미세조류의 생물량이 증가하고, 반대로 모래질과 같은 조립질 기질로 갈수록 생물량이 낮아지는 결과를 나타내었다. 또한 Suzuki and Yamamoto[2005]도 본 실험과 유사하게 glass bead를 사용한 부착 기질 특이성 실내실험에서 기질의 크기에 따라 생물량 및 비성장속도가 차이가 나타나, 기질의 중요성을 강조하였다. 하지만 Cahoon *et al.*[1999]는 저서성 미세조류와 입도와 차이가 역의 관계를 보여, 미세입자 퇴적물이 부착되는 친해 생태계에서는 기초 생산력은 낮아질 것으로 설명하였다. 이는 본 연구와 상반되는 결과로 저서성 미세조류 중에 따라 부착기질의 특이성이 달라질 수 있음을 알 수 있다.

저서성 미세조류 *Nitzschia sp.*가 기질에 부착할 수 있고 운동할 수 있는 이유는 세포에서 분비되는 점액질(mucilage) 때문이다. 이 점액질은 종구(raphe)의 중심질(central nodule)과 극열(terminal fissure)부근에 많이 존재하는 소포(vesicles)로부터 분비되며, 종구(raphe)에 따라 극재하고 있는 틈(raphe fissure)으로 점액질이 나와 기질에 부착하게 된다. 운동은 세포내의 액틴섬유(actin filaments)의 움직임에 따라 세포막의 transmembrane component와 점액질이 컨베이어벨트 이동과 같이 극열(terminal fissure)의 부근까지 이동하게 되고 결국에는 끊어지게 되며, 재차 중심질(central nodule)에서부터 생성되는 점액질(terminal fissure)이 극열(terminal fissure)로 이동함에 따라 *Nitzschia sp.*는 전진하게 된다(Edgar and Pickett-Heaps[1984]; Stal and de Brouwer[2003]). 이렇게 분비되는 점액질은 EPS(extracellular polymeric substances)라 불리기도 하며, 조간대의 경우 퇴적물의 표면에 바이오필름을 형성하여 퇴적물의 교란을 막는 안정제로 작용할 뿐만 아니라 상위영양단계의 저서동물에 중요한 탄소 공급원이 된다(Decho [1990]; Smith and Underwood [1998]). *Nitzschia sp.*가 분비하는 EPS의 약 95%는 다당류(대부분이 글루코오스)와 같은 고분자 화합물이다(de Brouwer and

Stal[2002]).

현미경 관찰에서 대수성장기의 모든 세포들은 glass bead에 부착되어 있었으나, 쇠퇴기(stationary phase)의 세포들은 glass bead로부터 탈락되어, 세포 간에 응집되는 현상을 나타내었고, glass bead의 크기가 클수록 그 경향이 뚜렷하였다. 이는 성장단계별로 EPS의 농도가 달라진다는 것을 의미한다. EPS는 조도와 CO₂의 이용이 높은 광 영양(phototroph)상태일 때, 즉 광합성을 수행할 때 분비된다(야간에도 분비하지만, 이는 저장되어진 탄수화물을 분비하는 것임). 하지만 질소가 제한되어질 때는 고정된 CO₂는 단백질보다는 비 질소계열 다당류(non-nitrogenous polysaccharide) 합성에 사용하며, 잉여분은 EPS로 분비된다(Staats *et al.*[2000]). 배양상태와 같이 영양염이 크게 제한된다면 광합성 기능 저하 및 생존을 위한 내부 탄수화물(internal storage carbohydrate)소비에 따라 EPS의 분비는 낮아져, 기질로부터 탈락되어진다. 따라서 분비물의 농도는 주위 환경에 따라 달라지는 신진대사에 크게 의존한다고 할 수 있다(de Brouwer and Stal[2002]).

또한 저서 규조류는 부착형태에 따라 4가지로 나누며 *Nitzschia sp.*는 정단부착반형(apical pads)에 속하여(Kawamura and Hirano [1992]; Lee *et al.*[1999]), 비교적 다른 부착형태보다 쉽게 탈락이 된다. Kawamura[2004]도 부착형태에 따라 포복 활주형과 포복 고착형으로 나누었으며, 포복 활주형은 안정된 기질과 포식압이 낮고 충분한 광 조건에서 급격히 성장하는 종으로 부착력이 강하지 않아 쉽게 상위영양단계의 포식자에게 포식된다. 반면에 포복고착형은 광 조건에 크게 영향을 받지 않으며 부착력이 강하다. Yamamoto *et al.*[2004]와 Oh *et al.*[2007]에 따르면 저서성 미세조류 *Nitzschia sp.*는 약 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이상에서 광 저해 현상(photoinhibition)이 있으나, 성장을 위해서는 충분한 광의 공급이 필수적이며 활주 운동을 하기 때문에 포복 활주형이라 할 수 있다. 따라서 *Nitzschia sp.*는 수심이 얇은 연안해역에서 강한 해수의 물리적인 혼합 및 교란이 있을 경우 표영환경으로 쉽게 유출될 수 있고, 표층의 높은 광량에 따라서는 광 저해와 부착기질의 손실에 따라 성장이 제한될 수 있다. 따라서 안정된 수위가 아닐 경우 *Nitzschia sp.*는 생존경쟁에서 불리할 것으로 판단된다.

그러나 이와 같은 *Nitzschia sp.*의 생리 생태학적 특성은 저서 미세조류를 이용한 친환경적 오락 퇴적물의 환경개선과 관련해서는 매우 유용한 대상 생물이 될 수도 있다. 즉, 대량 배양한 세포를 살포하거나(Yamamoto *et al.*[1994]) 발광체의 존재에 따라 성장이 촉진되면(Fukami *et al.*[2002]; Ruangdej and Fukami[2004]; Oh *et al.*[2007]), 세포밀도의 증가에 따른 2차 유기오염이 발생할 가능성이 있지만, *Nitzschia sp.*는 기질에 대한 부착력이 그렇게 강하지 않기 때문에 상위 영양단계의 생물에게 좋은 먹이원이 된다. 따라서 포식에 따라 상위영양단계로 유기물은 전송되기에 2차 오염보다는 해역 생산성 향상이라는 긍정적인 요인으로 작용할 수 있기 때문이다.

본 연구는 *Nitzschia sp.*의 성장에 부착기질의 존재 유무와 크기가 어떤 영향을 주는지 알아보았으며, 그 결과 glass bead의 크

기가 성장속도 뿐만 아니라 세포밀도에도 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 부착미세조류의 생리실험을 위해서는 예비실험으로 부착기질 유무 및 대상 종에 적합한 부착입자의 크기의 고려가 절대적으로 필요한 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2006년도 교육인적자원부의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2006-353-C00060)로 지원기관에 감사를 표한다.

참고문헌

- [1] Brand, L.E., Guillard, R.R.L. and Murphy, L.S., 1981, "A method for the rapid and precise determination of acclimated phytoplankton reproduction rates", *J. Plankton Res.*, Vol. 3, 193-201.
- [2] Cahoon, L.B., Nearhoof, J.E. and Tilton, C.L., 1999, "Sediment grain size effect on benthic microalgal biomass in shallow aquatic ecosystems", *Estuaries*, Vol. 22, 735-741.
- [3] de Brouwer, J.F.C. and Stal, L.J., 2002, "Daily fluctuations of exopolymers in cultures of the benthic diatoms *Cylindrotheca closterium* and *Nitzschia* sp. (Bacillariophyceae)", *J. Phycol.*, Vol. 38, 464-472.
- [4] Decho, A.W., 1990, "Microbial exopolymer secretions in ocean environments. Their role(s) in foodwebs and marine processes", *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, Vol. 28, 73-153.
- [5] Edgar, L.A. and Pickett-Heaps, J.D., 1984, "Diatom locomotion", *Prog. Phycol. Res.*, Vol. 3, 47-88.
- [6] Fukami, K., Murata, N., Morio, Y. and Nishijima, T., 2002, "Improvement of eutrophic coastal bottom environments by using an optical fiber and effective psychrophilic bacteria", *Fish. Sci.*, Vol. 68, 617-620.
- [7] Guillard, R.R.L. and Ryther, D., 1962, "Studies of marine planktonic diatoms. I. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran", *Can. J. Microbiol.*, Vol. 8, 229-239.
- [8] Kim, K.R. and Ki, J.H., 1987, "Studies on chemical and biological processes in the Keum river estuary, Korea. I. The cycle of dissolved inorganic nitrogen: General considerations", *J. Oceanol. Soc. Korea*, Vol. 22, 191-203.
- [9] Kawamura, T., 2004, "Ecology of benthic diatoms", *Nippon Suisan Gakkaishi*, Vol. 70, 788-789.
- [10] Kawamura, T. and Hirano, R., 1992, "Seasonal changes in benthic diatom communities colonizing glass sides in Aburatsubo Bay, Japan", *Diatom Res.*, Vol. 7, 227-239.
- [11] Lee, J.-B., Choa, J.-H. and Koh, H.-B., 1999, "Community structure and ecological characteristics of attached diatom in the coastal waters of Cheju Island, Korea", *Algae*, Vol. 13, 55-66.
- [12] McIntyre, H.L., Geider, R.J. and Miller, D.C., 1996, "Microphytobenthos: The ecological role of the "secret garden" of unvegetated, shallow-water marine habitats. I. Distribution, abundance and primary production", *Estuaries*, Vol. 19, 186-201.
- [13] Oh, S.J., Park, D.-S., Yang, H.-S., Yoon, Y.H. and Honjo, T., 2007, "Bioremediation on the benthic layer in polluted inner bay by promotion of microphytobenthos growth using light emitting diode (LED)", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, Vol. 10, 93-101.
- [14] Oh, S.J., 2008, "Nutrient uptake kinetics of *Nitzschia* sp. for bioremediation of the benthic layer in a polluted inner bay", *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 41, 301-304.
- [15] Ruangdej, U. and Fukami, K., 2004, "Stimulation of photosynthesis and consequent oxygen production in anoxic bottom water by supply of low-intensity light through an optical fiber", *Fish. Sci.*, Vol. 70, 421-429.
- [16] Smith, D.J. and Underwood, G.J.C., 1998, "Exopolymer production by intertidal epipellic diatoms", *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 43, 1578-1591.
- [17] Staats, N., Stal, L.J., de Winder, B. and Mur, L.R., 2000, "Oxygenic photosynthesis as driving process in exopolysaccharide production of benthic diatoms", *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, Vol. 193, 261-269.
- [18] Stal, L.J. and de Brouwer, J.F.C., 2003, "Biofilm formation by benthic diatoms and their influence on the stabilization of intertidal mudflats", *Berichte-Forschungszentrum Terramare*, Vol. 12, 109-111.
- [19] Suzuki, M. and Yamamoto, T., 2005, "Effects of grain size of substrate on the growth of a benthic microalgae *Nitzschia* sp.", *J. Grad. Sch. Bioshp. Sci. Hiroshima Univ.*, Vol. 44, 31-38.
- [20] Watermann, F., Hillebrand, H., Gerdes, G., Krumbein, W.E. and Sommer, U., 1999, "Competition between benthic cyanobacteria and diatoms as influenced by different grain sizes and temperatures", *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, Vol. 187, 77-87.
- [21] Yamamoto, T., Oh, S.J. and Goto I., 2004, "Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of microphytobenthos *Nitzschia* sp.", *Jpn. J. Phycol.*, Vol. 52, 5-11.
- [22] Yoon, Y.H., 2000, "On the spatio-temporal distributions of nutrients and chlorophyll *a* concentration, and the environmental factors on the variation of phytoplankton biomass in the Shiahae, southwestern part of Korean Peninsula", *Korean J. Environ. Biol.*, Vol. 16, 403-409.

2009년 1월 6일 원고접수

2009년 4월 10일 심사완료

2009년 4월 13일 수정본 채택