

착생해조류, 석묵의 배아 생존과 성장에 미치는 퇴적물(부니), 해수유동 및 조도의 영향

유현일·김지환¹·최한길*

원광대학교 생명과학부, ¹전라남도 수산기술사업소 해남지소

Effects of Sediment (silt), Water Movement, and Light Intensity on the Survival and Growth of Sporelings of Epiphytic *Campylaephora hypnaeoides*

Hyun Il Yoo, Ji Hwan Kim¹ and Han Gil Choi*

Faculty of Biological Science, Wonkwang University,
Iksan 570-749, Korea

¹Jeollanam-do Provincial Government Fisheries Technology Office
Haenam Branch, Haenam 536-812, Korea

The effects of sediment and water movement on the survival and growth of *Campylaephora hypnaeoides* J. Agardh were examined in culture to elucidate why this species grows as an epiphytic alga. The survival and growth rates of *Campylaephora* tetraspores declined as the sediment concentration increased under both water-movement and no-water-movement treatments. After 5-day cultures under various sediment treatments, the respective survival and growth rates ranged from 27.32 to 78.63% and 0.22 to 0.29 day⁻¹ under the no-water-movement and from 15.66 to 82.69% and 0.19 to 0.31 day⁻¹ under the water-movement treatments. The maximum survival and growth of *C. hypnaeoides* tetraspores occurred at 20 and 40 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectively. The survival of *Campylaephora* tetraspores and germlings declined with increasing dark period, but the tolerance of total darkness based on the survival rates was two-times greater for 5-day old sporelings than for tetraspores after 12 days. In conclusion, *Campylaephora hypnaeoides* grows as an epiphytic alga because its survivorship and growth decline rapidly with greater water movement and sedimentation and with lower light intensities.

Key words: *Campylaephora hypnaeoides*, Sediment, Water movement, Light intensity, Survival, Growth, Sporelings

서 론

해조류의 생존 및 생장은 광, 수온, 염분, 해수의 유동 (파도) 및 영양염과 같은 다양한 환경요인의 단독 혹은 복합작용에 의해 영향을 받고 있으며 (Lobban and Harrison, 1997), 특히, 현미경적 크기의 해조류 포자 혹은 배아는 성체 인근에 포자 은행 (spore bank)을 형성하고 있다가 성장에 필요한 광을 차단하는 성체가 제거되면 빠른 성장을 보이는 등 환경에 매우 민감한 반응을 보이는 것으로 알려져 있다 (Hoffmann and Santelices, 1991). 해수의 유동은 해조류 포자의 확산, 수정, 부착 및 가입, 나아가 그들의 생존 및 성장에 직·간접적으로 영향을 줌으로써 (Hoffmann, 1987; Fletcher and Callow, 1992; Vadas et al., 1992; Pearson and Brawley, 1996), 파도의 노출 정도에 따라 출현종이 다르게 나타난다 (Hurd, 2000). 해수의 유동은 영양염과 가스교환을 용이하게 하는 장점이 있으나, 강한 해수 움직임은 기질에 부착된 해조류 포자와 배아의 탈락을 가져오는 부작용도 발견된다 (Vadas et al., 1992; Lobban and Harrison, 1997).

해수의 유동과 밀접한 관련이 있는 퇴적물은 현미경적 크기

인 해조류 포자의 부착을 억제하고 부착된 포자 혹은 배아에 도달하는 광량 및 영양염 흡수를 억제함으로써 (Deviny and Volse, 1978; Chapman and Fletcher, 2002; Arakawa, 2005), 배아의 생존과 성장을 감소시키는 것으로 확인되었다 (Arakawa and Matsuike, 1992; Lyngby and Mortensen, 1996; Umar et al., 1998). 퇴적물은 참홀과래 (*Monostroma nitidum*)와 미역 (*Undaria pinnatifida*) 포자의 발아 및 성장 (Kida and Maegawa, 1978; Suzuki et al., 1998)은 물론, 미역과 감태 (*Ecklonia cava*)의 유주자가 기질에 부착하는 것을 억제하는 것으로 나타났다 (Arakawa and Matsuike, 1992). 또한, 갈조류인 *Macrocystis pyrifera*의 접합자는 퇴적물로 인해 발아가 억제되며, 해수유동에 의한 퇴적물 입자의 이동은 기질로부터 배아의 탈락을 유도하였다 (Deviny and Volse, 1978). 하지만, 홍조류의 경우 배아에 대한 퇴적물과 해수유동의 영향은 거의 알려져 있지 않고, 퇴적물이 *Gracilariopsis lemaneiformis*, *Neorhodomela larix* 및 각상형 석회조류 성체의 성장을 억제하는 것으로 확인되었다 (Santelices et al., 1984; D'Antonio, 1986).

석묵 (*Campylaephora hypnaeoides* J. Agardh)은 홍조류 비단 풀과에 속하며, 우리나라 남·서해안과 동해안 남부의 조간대 하부 및 저조선에 서식하는 유용 해조류로서 (Notoya, 1979;

*Corresponding author: hgchoi@wku.ac.kr

Kirihara et al., 1990), 배우체, 과포자체 및 사분포자체가 세대 교번하는 폴리시포니아형 (*Polysiphonia* type)의 생활사를 가진다 (Kang, 1968; Boo, 1991). 본 종은 암반을 부착기질로 사용하지 않고 가지의 정단에 있는 갈고리로 다른 해조류 (예, 모자반, 산말, 툯)에 부착하여 서식하는 일년생 착생해조류로 알려져 있다 (Kang, 1968). 하지만, 석목의 포자는 실내배양실험에서 유리에 부착 및 성장하였으며 (Boo, 1991), 본 연구의 예비실험에서도 슬라이드글라스, 크레모나사와 가리비패각 등에도 부착하여 성장하는 것이 확인되어 자연 서식처인 암반이나 다른 기질에 부착된 석목이 발견되지 않는 것은 매우 특이한 현상이다.

따라서, 본 연구의 목적은 자연서식처의 암반 및 다른 기질에 부착된 석목이 관찰되지 않는 것이 퇴적물에 의한 광의 감소로 부착된 석목포자의 생존율 감소로 인한 것인지, 해수 유동에 의한 퇴적물 입자의 이동으로 포자탈락이 발생하였기 때문인지를 구명하는 것이다. 또한, 수온이 상승한 여름철에 자연서식처에서 사분포자체가 소멸된 후 수온이 하강한 가을에 과포자체가 출현하기까지 약 4-5개월 동안 육안적 관찰이 불가능한 포자나 배아 상태로 존재할 것으로 예상되는데, 이들의 암조건에서의 적응양상을 확인하여 석목의 개체군 유지에서 포자은행의 존재 가능성을 확인하려 하였다.

재료 및 방법

본 연구를 위해 전남 보길도 (34° 08'N, 126° 33'E)의 양식 툯에 착생한 석목의 사분포자체를 2008년 1월에 채집하여 현장에서 해수와 함께 플라스틱 샘플병에 담아 실험실로 운반하였다. 사분포자체에서 성숙한 사분포자탁을 분리하여 여과해수 (\varnothing 0.45 μ m)와 멸균해수로 수회 세척하여 조체에 착생한 규조류와 착생동물을 제거한 후, 100 ml의 PES배지 (Provasoli, 1968)가 담긴 비이커에 넣어 15°C, 20 μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$ 및 16:8 h L:D (Light:Dark)의 광주기로 세팅된 배양기에서 사분포자를 방출시켰다. 포자방출이 확인되면 비이커에서 사분포자탁을 제거하고 포자가 부착하도록 24시간 방치하였다.

퇴적물과 해수유동의 영향

퇴적물과 해수유동이 석목포자의 생존과 성장에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 해수유동 (유, 무) \times 퇴적물 (0, 5, 10, 20 mg/cm^2)의 실험구를 만들었다. 해수의 유동은 진탕배양기 (shaking incubator)를 180 rpm으로 회전시켜 만들었으며, 대조구는 정치배양되었다. 퇴적물은 충남 서천군 다사리해변에서 채취하여 표준망체 (\varnothing 44 μ m)를 통과한 퇴적물을 550°C의 화로 (J-FM2, JISICO, Korea)에 30분간 넣어 퇴적물에 포함된 유기물을 모두 제거하였다. 퇴적물 (0, 5, 10, 20 mg/cm^2)은 5 ml의 멸균해수에 넣어 Voltex로 균일하게 섞어 배양액 (100 ml)과 함께 사분포자가 부착된 비이커에 공급되었다. 모든 실험에서 3개의 반복구를 두었으며, 15°C, 16:8 h (L:D), 20 μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$ 로 세팅된 배양기에서 5일 동안 배양한 후 석목의 생존률과 성장률을 측정하였다. 포자의 생존율은 포자가 부착된 비이커의 바닥 외부에 6개의 원을 표시한 후

배양 전-후 (before-after)의 포자밀도를 실체현미경으로 검정하여 계산하였다. 석목포자의 상대성장률 (RGR, relative growth rate)은 방출된 포자의 크기와 배양후의 배아 길이를 이용하여 계산하였다 (Rueness and Tananger, 1984).

$$RGR = (\ln P_{t2} - \ln P_{t1}) / T_2 - T_1$$

여기서 P_{t1} 과 P_{t2} 는 각각 T_1 과 T_2 시간의 석목 포자의 길이를 의미한다.

조도의 영향

슬라이드글라스에 부착된 석목의 사분포자를 PES배지 (30 ml)가 들어있는 페트리디쉬에 옮겨 다양한 조도 (0, 5, 10, 20, 40, 80, 160 μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$)에서 7일 동안 배양하였다. 모든 실험구에서 온도 (15°C)와 광주기는 16:8 h (L:D)로 동일하게 유지되었고 배양액은 3일 간격으로 전량 교환되었으며, 배양 7일 후 사분포자의 생존율과 상대성장률을 위에서 언급한 방법으로 계산하였다.

암조건에서 포자와 배아생존율

암조건에 대한 석목 포자 및 배아의 내성을 확인하기 위해, 2008년 2월에 동일한 장소에서 성숙한 사분포자체를 채집하여 위에서 언급한 방법으로 포자 방출을 유도하여 실험하였다. 사분포자의 부착이 확인된 슬라이드글라스 (포자 실험구)와 15°C, 40 μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$, 16:8 h LD의 조건에서 5일간 배양하여 발아한 배아가 부착된 슬라이드글라스 (배아 실험구)를 30 ml의 PES배양액이 들어있는 페트리디쉬에 넣고 (포자 및 배아 실험구별 각 18개 페트리디쉬), 알루미늄 호일로 밀봉하여 광을 차단한 후 15°C의 배양기에 넣고 2일 간격으로 페트리디쉬 3개씩을 개봉하여 포자의 생존율을 측정하였다. 석목포자와 배아는 고유색깔인 검붉은색을 유지한 개체를 생존한 것으로, 탈색 혹은 탈락된 개체를 사망한 것으로 구분하여 부착포자에 대한 생존포자의 비율로 생존율을 계산하였다.

통계분석

해수유동 및 퇴적물이 포자 생존율과 성장률에 미치는 영향에 대한 통계분석은 Levene의 등분산검정 (Test of homogeneity of variances)을 실시하여 데이터의 동질성을 확인한 후에 Two-way ANOVA로 유의차를 검정하였다. 포자 생존율과 성장률에 대한 유의차가 발견되면 Tukey's test로 사후검정을 실시하였다. 또한, 석목 포자의 성장단계 (포자, 배아)에 따른 암조건에서의 생존율 변화는 Two-way ANOVA 분석으로, 조도별 생존율과 성장률은 One-way ANOVA로 실험구별 유의차를 검정하였다. 모든 자료의 분석은 STATISTICA version 7.0의 통계프로그램을 사용하여 실시되었다.

결 과

퇴적물과 해수유동의 영향

석목포자를 다양한 퇴적물 농도 (0, 5, 10, 20 mg/cm^2)에서 5일 동안 정치배양한 후의 포자생존율은 27.32-78.63%로서

퇴적물의 농도와 반비례하는 경향을 보였다 (Fig. 1A). 해수유동 실험구에서도 포자생존율은 정치배양과 유사하게 퇴적물의 양이 증가될수록 감소되는 경향을 보였으며, 포자 생존율은 15.66-82.69%로 나타났다 (Fig. 1A). 석목 포자생존율은 퇴적물의 양에 따라 영향을 받는 것으로 나타났으며 ($F_{3,16}=91.92, P<0.001$), 해수유동에 따른 생존율 변화는 유의차가 없는 것으로 확인되었다 ($F_{1,16}=0.53, P=0.48$). Tukey 검정결과 석목포자의 생존율은 $5\text{mg}/\text{cm}^2$ 이하의 퇴적물 농도에서는 영향을 받지 않지만, 이후 농도의 증가에 따라 감소하였다 (Table 1).

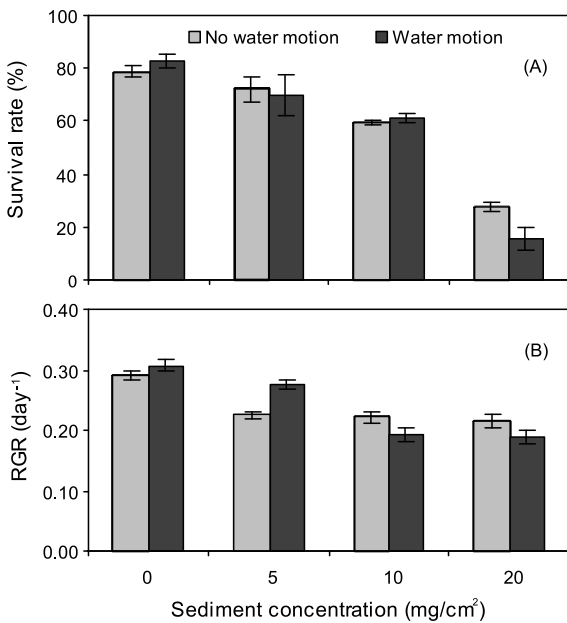


Fig. 1. Effects of sediment and water movement on the survival rate (A) and relative growth rate (B) of *Campyloaephora hypnaeoides* after 5 days in culture. Vertical bars indicate standard error.

Table 1. Results of two-way ANOVA and Tukey tests for the effects of sediment and water movement on the survival rate and relative growth rate (RGR) of *Campyloaephora hypnaeoides* after 5 days in culture

Factor	df	MS	F	P	Survival			RGR		
					MS	F	P	MS	F	P
Water movement	1	23.48	0.53	0.48	0.0001	0.18	0.63			
Sediment	3	4044.75	91.92	<0.001	0.0122	42.17	<0.001			
Interaction	3	73.40	1.66	0.22	0.0021	7.24	<0.001			
Error	16	44.29								
Tukey test (P =0.05)										
Water movement										
Sediment(mg/cm²)					0 = 5 ≥ 10 > 20	0 > 5 > 10 ≥ 20				

석목 포자의 상대생장률은 정치배양에서 $0.22-0.29 \text{ day}^{-1}$ 이고 해수유동이 있는 실험구에서 $0.19-0.31 \text{ day}^{-1}$ 이며, 퇴적물이 증가할수록 포자의 생장은 억제되었다. 하지만, 정치배양에서

는 퇴적물의 양이 $5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 일 때, 해수유동 실험구에서는 $10 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 일 때 포자의 생장률이 급격하게 감소하는 약간 다른 패턴을 보였다 (Fig. 1B). 석목 포자의 생장에 대한 통계 분석 결과, 생장률은 해수유동에 따라 유의차를 보이지 않았으나 ($F_{1,16}=0.18, P=0.63$), 퇴적물 양이 영향을 미치는 것으로 확인되었다 ($F_{3,16}=42.17, P<0.001$). 하지만, 석목포자의 생장은 해수유동과 퇴적물 양에 의한 상호작용에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다 ($F_{3,16}=7.24, P<0.001$). 퇴적물 농도별 석목포자의 생장률에 대한 사후 검정의 결과, 생장률은 퇴적물의 증가에 따라 생존율도 감소하는 것으로 확인되었으나, 10과 $20 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 의 농도에서는 차이가 없는 것으로 확인되었다 (Table 1).

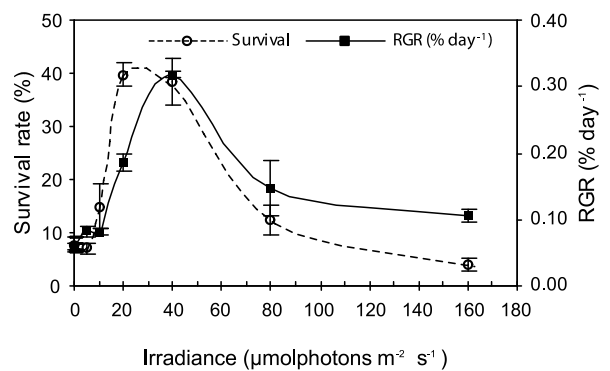


Fig. 2. Average survival rate and RGR (Relative growth rate) of *Campyloaephora hypnaeoides* at various irradiance levels. Bars are standard errors (n=20 replicates).

Table 2. Results of one-way ANOVA and Tukey tests for the effects of irradiance levels on the survival rate and RGR of *Campyloaephora hypnaeoides*

Factor	df	MS	F	P
Survival rate				
Irradiance	6	673.42	29.01	<0.001
Error	14	23.21		
Tukey test (P =0.05)				
Irradiance				0 = 5 = 10 = 80 = 160 < 20 = 40
RGR				
Irradiance	6	0.03	135.66	<0.001
Error	14	0.00		
Tukey test (P =0.05)				
Irradiance				0 ≤ 5 = 10 = 160 < 20 = 80 < 40

조도의 영향

석목의 사분포자를 다양한 조도 (0, 5, 10, 20, 40, 80, 160 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 에서 7일간 배양한 결과, 저조도 (0-10 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)에서는 생존율 (7.03-7.75%)이 매우 낮았으며, 조도와 함께 생존된 포자는 증가되어 40 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 에서 생존율은 38.31%로 최대였다 (Fig. 2). 고조도인

80 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 포자의 생존율은 급감하여 조도가 포자의 생존에 영향을 미치는 것으로 확인되었다 ($F_{6,14}=29.01$, $P<0.001$). 낮은 조도 (0-10 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$)에서 사분포자의 생존율은 유의차가 없었으며, 20-40 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 높은 생존율을 보이다가 이후 감소하는 패턴을 나타냈다 (Table 2).

배양 7일 후 조도별 포자의 생장을 보면, 암조건에 놓아 둔 포자는 71.66 μm 로 부피가 약간 팽창하였으나 세포분열은 관찰되지 않았다. 낮은 조도 (5-10 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$)에서 사분포자는 세포분열이 일어나 82.16-82.54 μm 의 길이생장을 보였다. 석목 사분포자의 가근 (rhizoid)이 형성되는 발아는 20 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이상에서 관찰되었으며, 최대생장률 (0.32 day^{-1})은 40 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 일어났다. 80 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이상의 고조도에서는 상대생장률이 0.15 day^{-1} 로 급감하여 광억제 (photoinhibition)가 일어났다 (Fig. 2). 따라서, 석목 배아의 생장은 조도에 의해 영향을 받는 것으로 확인되었으나 ($F_{6,14}=135.66$, $P<0.001$), 저조도 (0-10 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$)에서는 광의 부족으로 인해, 고조도 (80-160 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$)에서는 광억제에 의해 사분포자 생장에 차이를 보이지 않는 것으로 나타났고 생장을 위한 최적조도는 20-40 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 확인되었다 (Table 2).

암조건에서 포자와 배아생존율

석목의 사분포자를 방출 직후 암조건으로 이동시킨 경우에는 발아되지 않았으며, 배양 2일과 4일까지는 상대적으로 높은 생존 (78.06-63.95%)을 보였으나 점차 탈색 및 사멸되는 포자가 증가하였다 (Fig. 3). 배양 8일 후에는 포자의 절반이 사망하여 생존율은 44.85%로 감소하였으며, 12일 후에는 포자의 22.86%만이 생존하였다. 배양 5일된 배아를 암조건에 노출한 경우, 배양 12일 후에도 44.66%의 배아가 생존하여 동일한 시기의 포자에 비해 2배 이상의 높은 생존율을 보였으며 ($F_{1,24}=47.62$, $P<0.001$), 포자와 배아가 모두 광합성이 불가능한 암조건에 오래 방치될수록 생존율은 감소하였다 ($F_{5,24}=89.81$, $P<0.001$).

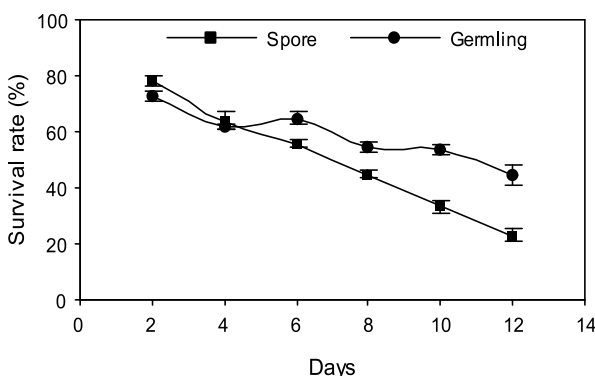


Fig. 3. Average survival rates of *Campylocephora hypnaeoides* spores and 5-day old germlings in darkness. Survival rates were determined at 2-day intervals. Bars are standard errors (n=30 plants).

고찰

광은 해조류의 성장 및 수직분포를 결정하는 중요한 환경요인이다 (Lobban and Harrison, 1997). 석목과 근연종인 *Ceramium strictum* (Kützinger)은 2-100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 조도에서 성장하는 것으로 알려져 있으며 (Gabrielsen et al., 2003), 굵은석목 (*Campylocephora crassa*)의 사분포자에서 발아한 어린 배우체는 20-250 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 넓은 범위에서 유사한 생장을 보였고, 최대생장은 20°C의 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 일어났다 (Boo et al., 1991). Notoya (1979)는 일본산 석목의 사분포자채 배아는 20°C의 20-40 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서, 배우체는 20°C의 160 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최대생장이 일어난다고 하였다. 본 연구에서 한국산 석목의 배우체는 20°C에 비해 15°C에서 그리고 40 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최대 생장을 보여 Notoya (1979)의 연구결과와 다른 온도 및 조도의 반응을 보였으나 20-160 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 넓은 조도범위에서 생장이 가능함이 밝혀졌다. 이러한 결과를 종합해 보면, 석목을 포함하는 *Campylocephora* 속 해조류는 광범위한 조도에서 생존이 가능하도록 적응되었으며 서식환경에 따라 생존 및 생장을 위한 최적 조도가 변화하는 것으로 판단된다.

한국산 석목 배우체의 상대생장률 (RGR)은 최적생장조도에서 0.32 day^{-1} 로서, 일본산 석목 배우체 (0.26 day^{-1})에 비해 약간 높은 것으로 나타났으나 (Notoya, 1979), 배양조건 및 기간을 고려해 보면 큰 차이가 없는 것 같다. 한편, Notoya (1979)는 일본산 석목은 배우체 (0.26 day^{-1})에 비해 포자체 (0.30 day^{-1})의 생장률이 높아 빠른 생장을 보이기 때문에 포자체를 대량 양식에 이용하여야 한다고 하였다. 근연종인 굵은석목 (포자체)의 상대생장률은 약 0.27 day^{-1} 로서 (Boo et al., 1991), 다른 홍조류인 *Gigartina skottsbergii* (Setchell et Gardner) 배우체의 0.06 day^{-1} (Mansilla et al., 2008)에 비해 약 5배 이상 높게 나타냈다. 또한, *Porphyra pseudolinearis* (Ueda)와 *P. abbotiae* (Krishnamurthy)의 엽체의 생장률도 각각 0.08 day^{-1} 과 0.09 day^{-1} 로써 석목에 비해 낮았으며 (Stekoll et al., 1999), 갈조류인 *Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh의 배아 단계에서의 생장률 (0.21 day^{-1})에 비교해도 빠른 생장을 보이는 것을 확인할 수 있었다 (Choi et al., 2008). 석목의 근연종과 다른 종에 비해 석목 배아가 빠른 생장을 보인 것은 착생해조류인 석목이 숙주 해조류에 비해 빨리 생장함으로 효과적인 광 확보를 위한 적응의 결과로 사료된다.

착생해조류 (epiphyte)는 숙주 (basiphyte)에 부착하여 다양한 해양동물의 먹이 및 서식처를 제공하는 생태적인 역할을 수행하고 있다. 착생해조류는 숙주해조류에 대한 초식자의 섭식을 대신하는 이점을 주기도 하지만, 숙주해조류가 광합성에 필요한 탄소와 광을 차단하여 숙주해조류의 성장 및 생식을 감소시킬 뿐 만 아니라, 과도한 착생해조류는 과도에 의한 숙주의 탈락을 가져오기도 한다 (Buschmann and Gómez, 1993). 일반적으로 착생해조류는 숙주 특이성 (host-specific)이 없는 것으로 확인되었으나 (Wahl and Mark, 1999),

*Vertebrata (=Polysiphonia) lanosa*는 *Ascophyllum nodosum*를, *Coilodesme japonica*는 *Cystosiera hakodatensis*를 절대적인 숙주로 사용하는 것이 확인되었다 (Deshmukhe and Tatewaki, 2001; Longtin and Scrosati, 2009). 착생해조류인 석목은 자연 생태계에서 조간대 하부와 조하대에 서식하는 모자반, 산말, 툯 등 주로 해중림을 구성하면서 마디 (node)가 많은 갈조류에 주로 부착하는 것으로 확인되어 숙주-특이성이 없었으며, 실내배양에서는 바위와 가리비패각 뿐만 아니라 인공기질 (유리, 크레모나사)에도 부착하여 발아 및 성장하였다. 따라서, 석목이 조간대 하부와 조하대에 위치한 암반을 포함한 자연기질에서 관찰되지 않는 것은 포자가 기질에 부착한 이후 퇴적물로 인한 광 부족 혹은 해수의 유동에 의한 배아의 탈락 등의 물리적인 요인 (Vadas et al., 1992)에 의한 포자의 사망이 발생했기 때문으로 사료된다.

해수의 유동은 해조류의 생존과 생장에 긍정적인 요인과 부정적인 영향을 미치는데 (Airoldi, 2003), 일반적으로 해수의 유동은 퇴적물 입자를 이동시켜 부착된 해조류 포자의 탈락을 발생시킴으로써 해조류의 생존을 감소시키는 것으로 알려져 있다 (Devinny and Volve, 1978). Tayler and Schiel (2003)은 해조류 3종 (*Hormosira banksii*, *Cystophora torulosa*, *Durvillaea antarctica*)의 접합자를 기질에 부착시킨 후, 해수유동에 노출시킨 실내실험에서 이들의 생존율이 *H. banksii*가 40-91%, *C. torulosa*는 26-99%, 그리고 *D. antarctica*는 75-99%로 나타난다고 보고하여 기질에 대한 접합자의 부착시간과 생존율은 비례한다고 하였다. 또한, 야외에서 과도에 노출시킨 경우, *H. banksii*의 생존율 (7-31%)은 *D. antarctica* (83-99%)에 비해 현저하게 낮아 종별로 해수유동에 대한 내성이 다를 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 퇴적물이 없이 해수유동만 주어진 실험구에서 석목포자의 생존률은 83%로 정치배양 (79%)에 비해 생존율이 높게 나타났다. 이러한 결과는 해수의 유동에 의한 생존률 감소를 보고한 Tayler and Schiel (2003)의 결과와 다르지만, 포자가 기질에 부착할 수 있는 시간이 2배 (24시간)로 길었으며, 해수의 유동속도 및 실험종이 달라 정확한 비교는 어려웠다. 본 연구에서 해수유동이 석목 배아의 성장을 증가시키는 결과로 볼 때, 해수유동 조건에서 정치배양에 비해 높은 생존률을 보인 이유는 *Gracilaria parvispora* Abbott의 성장에서 밝혀진 것처럼 (Ryder et al., 2004), 해수유동에 의해 석목조체의 인근에 있는 해수의 영양염 및 CO₂ 확산 촉진에 의해 광합성이 증가됨으로 발아초기 배아의 사망이 감소한 것으로 판단된다 (Gonen et al., 1995; Ryder et al., 2004). 또한 Vadas et al. (1992)은 해수의 유동은 그 자체로 쓸림 (scour)현상을 초래하지 않으며, 포자는 해수흐름의 속도가 낮은 지역에 부착한다고 설명하여 본 연구에서 해수유동조건에 높은 생존률에 대한 설명을 뒷받침해 주었다. 하지만 해수유동에 의한 퇴적물 입자의 움직임은 기질에 부착된 포자의 탈락을 초래하고 이들에 도달하는 광을 차단하여 생존 및 성장을 억제한다 (Chapman and Fletcher, 2002).

본 연구에서 석목 포자의 생존 및 생장은 퇴적물의 농도에 반비례하는 결과를 보였으며, 포자의 생존율은 20 mg/cm²의 퇴적물 농도에서 5일 후에 16-27%로 급감하였다. 또한, 석목

포자의 생장은 퇴적물 농도가 낮은 실험구 (5 mg/cm²)에서는 해수유동 실험구에서 높았으나 퇴적물의 농도가 높은 실험구 (10, 20 mg/cm²)에서는 해수유동 실험구에서 오히려 감소하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 퇴적물의 농도가 낮은 상태에서 해수의 유동은 퇴적물을 부유시켜 기질에 부착된 포자에 도달하는 광량을 증가시키지만 퇴적물의 농도가 증가된 상태에서 해수의 유동은 기질에 쌓인 퇴적물을 이동시켜 쓸림 현상을 발생하여 석목 포자의 생존과 생장에 나쁜 영향을 미치는 것으로 추정된다 (Devinny and Volve, 1978).

암조건에서의 포자 및 배아의 생존능력과 호조건의 광으로 회복되었을 때 정상적으로 분화 및 성장하는 것이 포자은행의 가능성을 보이는 것인데, 조하대에 서식하는 해조류 포자는 이러한 특성을 가진다 (Moss and Sheader, 1973). 예를 들면, *Laminaria hyperborea*의 배우체는 암조건에서 7주까지 (Kain, 1964), *Desmarestia aculeata* (L.) Lamour.의 배우체는 93일 이상 (Chapman and Burrows, 1970), *Halidrys siliquosa* (L.) Lyngb.는 120일까지 (Moss and Sheader, 1973) 존재하다가도 광이 회복되면 정상적인 성장을 하는 것으로 확인되었다. 본 연구에서 석목의 사분포자는 12일 후에 23%, 5일된 배아는 45%가 생존율을 보여, 갈조류의 배우체에 비해 암조건에서 생존 기간은 상대적으로 짧았으나, 5일된 배아가 포자에 비해 2배 이상의 생존율을 보이는 것은 석목이 관찰되지 않는 여름철에는 포자에 비해 암조건에 내성이 강한 배아로 존재하다가 가을에 성장하는 것으로 사료된다.

자연상태에서 다른 해조류에 착생하여 서식하는 석목은 숙주 해조류가 없는 유리기질에서도 비단풀속 해조류의 전형적인 생활사 (*Polysiphonia* type)를 완성함으로써 자연 암반기질에서도 부착 및 생장이 가능할 것으로 여겨진다 (Yoo, 2009). 그러나 퇴적물과 해수유동에 의한 생존감소는 물론 암조건에서 생존율의 급격한 감소를 보임으로써 자연상태의 암반기질에서 석목이 발견되지 않는 것은 퇴적물과 해수유동에 의한 매립 및 탈락이 주요한 요인으로 판단되지만, 자연상태에서는 다양한 환경요인이 복합적으로 작용할 것으로 추측된다. 동일한 이유로 석목은 퇴적물에 의한 매립을 상대적으로 줄이고 숙주의 생장에 따른 광의 확보를 위해 다년생 또는 위다년생의 다른 해조류 (모자반류 등)에 부착하여 생존하는 것으로 사료된다. 유용해조류인 석목에 대한 보다 폭넓은 생태적 특징을 이해하기 위해서는 향후 석목 포자가 다른 해조류에 부착하는 기작을 밝히는 연구 등이 폭 넓게 수행되어야 할 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 농림수산식품부 수산기술개발사업의 지원에 의해 이루어졌으며, 연구수행에 도움을 주신 전라남도 수산기술사업소 장흥지소와 해남지소의 선생님들께 감사드립니다.

참고문헌

Airoldi L. 2003. The effects of sedimentation on rocky coast assemblages. *Oceanogr Mar Biol* 41, 161-236.

- Arakawa H. 2005. Lethal effects caused by suspended particles and sediment load on zoospores and gametophytes of the brown alga *Eisenia bicyclis*. Fish Sci 71, 133-140.
- Arakawa H and Matsuike K. 1992. Influence on insertion of zoospores, germination, survival, and maturation of gametophytes of brown algae exerted by sediments. Nippon Suisan Gakk 58, 619-625.
- Boo SM. 1991. A Biosystematic Study on the Genus *Campylaephora* J. Agardh Rhodophyta. Ministry of Science and Technology, Seoul, Korea, 52.
- Boo SM, Fredriksen S, Rueness J and Lee IK. 1991. Field and culture studies on the life history of *Campylaephora crassa* (Okamura) Nakamura Ceramiales, Rhodophyta). Bot Mar 34, 437-45.
- Buschmann AH and Gómez P. 1993. Interaction mechanisms between *Gracilaria chilensis* (Rhodophyta) and epiphytes. Hydrobiologia 260/261, 345-351.
- Chapman ARO and Burrows EM. 1970. Experimental investigations into the controlling effects of light conditions on the development and growth of *Desmarestia aculeata* (L.) Lamour. Phycologia 9, 103-108.
- Chapman AS and Fletcher RL. 2002. Differential effects of sediments on survival and growth and growth of *Fucus serratus* embryos (Fucales, Phaeophyceae). J Phycol 38, 894-903.
- Choi HG, Lee KH, Yoo HI, Kang PJ, Kim YS and Nam KW. 2008. Physiological differences in the growth of *Sargassum horneri* between the germling and adult stages. J Appl Phycol 20, 729-735.
- D'Antonio CM. 1986. Role of sand in the domination of hard substrata by the intertidal alga *Rhodomela larix*. Mar Ecol Prog Ser 27, 263-275.
- Deshmukhe GV and Tatewaki M. 2001. Phenology of brown alga *Coilodesme japonica* (Phaeophyta, Dictyosiphonales) with respect to the host-specificity along Muroran coast, North Pacific Ocean, Japan. Indian J Mar Sci 30, 161-165.
- Devanny JS and Volse LA. 1978. Effects of sediments on the development of *Macrocystis pyrifera* gametophytes. Mar Biol 48, 343-348.
- Fletcher RL and Callow ME. 1992. The settlement, attachment and establishment of marine algal spores. Br phycol J 27, 303-329.
- Gabrielsen TM, Brochmann C and Rueness J. 2003. Phylogeny and interfertility of North Atlantic populations of "*Ceramium strictum*"(Ceramiales, Rhodophyta); How many species? Eur J Phycol 38, 1-13.
- Gonen Y, Kimmel E and Friedlander M. 1995. Diffusion Boundary layer transport in *Gracilaria conferta* (Rhodophyta). J Phycol 31, 768-773.
- Hoffmann AJ. 1987. The arrival of seaweed propagules at the shore: A review. Bot Mar 30, 151-165.
- Hoffmann AJ and Santelices B. 1991. Banks of algal microscopic forms: Hypotheses on their functioning and comparisons with seed banks. Mar Ecol Prog Ser 79, 185-194.
- Hurd CL. 2000. Water motion, marine macroalgal physiology and production. J. Phycol. 36, 453-472.
- Kain J. 1964. Aspects of the biology of *Laminaria hyperborea*. III. Survival and growth of gametophytes. J Mar Biol Ass UK 44, 415-433.
- Kang JW. 1968. Illustrated Encyclopedia of Fauna and Flora of Korea. Vol. 8 (Marine algae). Ministry of Education, Korea, 1-465.
- Kida W and Maegawa M. 1978. Studies on marine environments and maricultural resources in the waters around Zaga-shima (Ago Bay)-II. Effect of muddy water on the culture of *Monostroma*. Bull Fac Fish Mie Univ 1, 21-30.
- Kirihara S, Notoya M and Aruga M. 1990. Cultivation of *Campylaephora hypnaeoides* J. Agardh (Ceramiales, Rhodophyta). Jpn J Phycol 38, 377-382.
- Lobban CS and Harrison PJ. 1997. Seaweed Ecology and Physiology. Cambridge University Press, New York, U.S.A., 366.
- Longtin CM and Scrosati RA. 2009. Role of surface wounds and brown algal epiphytes in the colonization of *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyceae) fronds by *Vertebrata lanosa* (Rhodophyta). J Phycol 45, 535-539.
- Lyngby JE and Mortensen SM. 1996. Effects of dredging activities on growth of *Laminaria saccharina*. Mar Ecol 17, 345-354.
- Mansilla A, Palacios M, Navarro NP and Avila M. 2008. Growth and survival performance of the gametophyte of *Gigartina skottsbergii* (Rhodophyta, Gigartinales) under defined nutrient conditions in laboratory culture. J Appl Phycol 20, 889-896.
- Moss B and Shearer A. 1973. The effect of light and temperature upon the germination and growth of *Halidrys siliquosa* (L.) Lyngb. (Phaeophyceae, Fucales). Phycologia 12, 63-68.
- Notoya M. 1979. Life history of *Campylaephora hypnaeoides* J. Argardh (Ceramiales, Rhodophyta) in

- culture and environmental regulation of reproduction. *Jpn J Phycol* 27, 201-204.
- Pearson GA. and Brawley SH. 1996. Reproductive ecology of *Fucus distichus* (Phaeophyceae): an intertidal alga with successful external fertilization. *Mar Ecol Prog Ser* 143, 211-223.
- Provasoli L. 1968. Media and prospects for the cultivation of marine algae. In: Watanabe, A. & Hattorc, A. (eds) *Cultures and Collections of Algae. Proceedings of a United States-Japan Conference held at Hakone. 1966.* 63-75.
- Rueness J and Tananger T. 1984. Growth in culture of four red algae from Norway with potential for mariculture. *Hydrobiologia* 116, 303-307.
- Ryder E, Nelson SG, McKeon C, Glenn EP, Fitzsimmons K and Napoleon S. 2004. Effect of water motion on the cultivation of the economic seaweed *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) on Molokai, Hawaii. *Aquaculture* 238, 207-219.
- Santelices B, Vásquez J, Ohme U and Fonck E. 1984. Managing wild crops of *Gracilaria* in central Chile. *Hydrobiologia* 116, 77-89.
- Stekoll MS, Lin R and Lindstrom SC. 1999. *Porphyra* cultivation in Alaska: conchocelis growth of three indigenous species. *Hydrobiologia* 399, 291-297.
- Suzuki Y, Maruyama T, Takami T and Miura A. 1998. Inhibition effects of suspended and accumulated particles on adhesion and development of *Undaria pinnatifida* zoospores. *J Jpn Soc on Water Environ* 21, 670-675.
- Taylor DI and Schiel DR. 2003. Wave-related mortality in zygotes of habitat-forming algae from different exposures in southern New Zealand: the importance of 'stickability'. *J Exp Mar Biol Ecol* 290, 229-245.
- Umar MJ, McCook LJ and Price IR. 1998. Effects of sediment deposition on the seaweed *Sargassum* on a fringing coral reef. *Coral Reefs* 17, 169-177.
- Vadas RL, Johnson S and Norton TA. 1992. Recruitment and mortality of early post-settlement stages of benthic algae. *Eur J Phycol* 27, 331-351.
- Wahl M and Mark O. 1999. The predominantly facultative nature of epibiosis: experimental and observational evidence. *Mar Ecol Prog Ser* 69, 189-194.
- Yoo HI. 2009. Cultivation trial of *Campylaeophora hypnaeoides* in laboratory and field. Masters degree thesis. Iksan, Wonkwang University.

2010년 3월 29일 접수
 2010년 5월 12일 수정
 2010년 6월 10일 수리