

실내배양에서 납작돌잎(*Lithophyllum yessoense*)과 진분홍딱지(*Hildenbrandia rubra*)의 배아 생장에 미치는 환경요인의 영향

송지나 · 박서경 · 오지철 · 유현일 · 최한길* · 김영식¹ · 남기완²

원광대학교 생명과학부/기초자연과학연구소, ¹군산대학교 해양생물공학과, ²부경대학교 자원생물학과

The Effects of Environmental Factors on the Growth of *Lithophyllum yessoense* and *Hildenbrandia rubra* Sporelings in Laboratory Culture

Ji Na Song, Seo Kyoung Park, Ji Chul Oh, Hyun Il Yoo,
Young Sik Kim¹, Han Gil Choi* and Ki Wan Nam²

Faculty of Biological Science and Institute for Basic Science, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea

¹Department of Marine Biotechnology, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

²Department of Marine Biology, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

The effects of environmental factors, such as irradiance, daylength, salinity, and desiccation, on the growth of *Lithophyllum yessoense* and *Hildenbrandia rubra* sporelings were examined. Sporelings of each species were cultured with 10, 50, 80, 120, 150 $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for 14 days and their maximum growth occurred under 80 $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Germlings of both species survived for 21 days in darkness, and even the *L.yessoense* germlings grew. In the salinity experiment, sporelings of each species survived for 7 days and died after 14 days under 20 and 25 psu, but the sporelings grew well under 34 psu. Physiological features of each species with respect to the evaluated daylengths (8, 12, 14 and 16 h) were slightly different, and maximal growth occurred at 16 h for *L. yessoense* and at 14 h for *H. rubra* sporelings. Mortality of the sporelings increased with the exposure period, but *H. rubra* was less tolerant to desiccation than *L. yessoense*. In conclusion, sporelings of the two species showed similar growth responses to various environmental factors with slightly different physiological features with respect to salinity, daylength, and desiccation. However, more ecological and physiological studies on slow-growing crustose algae are required to elucidate the expansion of barren ground around the coastal areas of Korea.

Key words: Daylength, Growth, *Hildenbrandia rubra*, Irradiance, *Lithophyllum yessoense*, Salinity

서 론

대형 해조류(macroalgae)와 식물성플랑크톤을 포함하는 해양 조류(marine algae)는 지구 산소의 50-70%를 생산하고 CO₂의 약 25%를 흡수하고 침적하여 탄소순환에 관여하는 것으로 알려져 있다. 홍조류인 무절산호조류는 북극에서 남극까지, 환경이 열악한 조건대 상부에서부터 차갑고 매우 약한 광이 도달하는 한계 수심(최대 268 m)까지, 광범위한 분포를 보이며(Littler and Littler, 1985; Björk et al., 1995), "Maërl beds" (or rhodoliths)를 형성하는 *Phymatolithon calcareum*과 같이 부착하지 않는 그룹과 생물과 무생물의 표면을 피복하여 서식하

는 각상형(crustose form) 그룹으로 구분된다. 무절산호조류인 Maërl은 해양 저서군집의 피복된 면적에서 "Big Four" (켈프대, 해조숲, 해초대, 무절산호초대)에 포함되며(Foster, 2001), 유럽에서는 정원의 비료로 경제적 가치가 높아 프랑스의 Brittany해안에서는 1987년에 450,000톤이 채취되는 등(Potin et al., 1990), 과다 수확으로 개체군이 감소되고 있는 실정이다. 전 세계적으로 조하대에 주로 서식하는 각상형 무절산호조류는 산호초의 석회화율에 기여하고 다양한 저서생물 유생들의 착생을 유도하는 생태적 기능을 하고 있다(Fabricius and De'ath, 2001). 일본에서는 1950년대 초에 갯녹음 해역이 급격하게 증가되는 것을 관찰하고 다시마 숲(*Laminaria beds*)의 복원을 시

Article history;

Received 12 August 2013; Revised 19 November 2013; Accepted 28 November 2013

*Corresponding author: Tel: +82. 63. 850. 6579 Fax: +82. 63. 857. 8837

E-mail address: hgchoi@wku.ac.kr

Kor J Fish Aquat Sci 46(6) 827-834, December 2013

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0827>

pISSN:0374-8111, eISSN:2287-8815

© The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science. All rights reserved

도하였고(Noro et al., 1983), 우리나라에서는 1980년대 이후 무절산호조류의 피도가 증가하고(Sohn et al., 1986), 1990년대에는 제주도, 남해안과 동해안에서도 갯녹음의 피해가 확대되어 2000년 이후에는 해중립을 복원을 위해서 많은 관심을 보이고 있는 실정이다(Choi et al., 2002).

다른 해조류와 마찬가지로 무절산호조류의 생존과 생장은 조도, 염분, 건조 등의 다양한 환경요인에 의해 영향을 받는 것으로 확인되었고 이들의 생장은 무게, 석회화율과 광합성율로 측정되었으며(King and Schramm, 1982; Martin and Gattuso, 2009), 각상형 산호조류의 표면적과 석회화율은 밀접한 상관관계를 가졌다(Littler, 1973). *Phymatolithon calcareum*의 석회화율은 온도에 비해 염분에 의해 많은 영향을 받기 때문에 저염분인 기수역에서는 서식하지 않는다고 하였다(King and Schramm, 1982). 또한, 각상형 무절산호조류의 생존 및 광합성은 퇴적물, 해양에서 사용되는 방오물질, 영양염 증가, 수온 상승, 해양산성화와 질병 등 다양한 환경 변화에 의해 결정된다(DeBoer, 1981; Maudsley, 1990; Steneck, 1997; Gardner et al., 2005; Harrington et al. 2005; Martin and Gattuso, 2009; Semesi et al. 2009). 예를 들면, 무절산호조류의 가입(recruitment), 생장과 석회화율은 pCO_2 농도가 높은 산성화된 실험구에서 최대 92%까지 감소하였으며(Agegian, 1985; Jokiel et al., 2008; Kuffner et al., 2008), Russell et al. (2009)은 CO_2 농도와 영양염 농도가 증가되면 무절산호조류의 건조량, 피도와 광합성률이 감소하고 이런 환경에서 빠른 성장을 보이는 덩불형 해조류 군집으로 대체된다고 하였다. 광합성을 하는 무절산호조류는 대부분 저조도($1.6-40 \mu mol photon m^{-2} s^{-1}$)에 적응되어 있으나(Kuhl et al., 2001; Roberts et al., 2002), 열대종인 *Hydrolythion onkodes*의 포화조도는 $200-600 \mu mol photon m^{-2} s^{-1}$ 이고, 온대 해역인 Northern Ireland에 서식하는 *Phymatolithon calcareum*의 광합성 효율은 암조건과 $140 \mu mol photon m^{-2} s^{-1}$ 의 조도에서 감소하여 서식해역과 종에 따라 다른 광 반응을 보였다(Wilson et al., 2004). 이렇듯 다양한 환경요인에 대한 무절산호조류의 생존과 성장 반응은 종에 따라 다르기 때문에(DeBoer, 1981; Lobban and Harrison, 1994), 우리나라 연안에 서식하는 무절산호조류의 생리적 특성을 가능한 많이 파악하는 것이 갯녹음 해역의 발생 및 대책방안을 수립하는데 중요한 자료가 될 것이다.

따라서, 본 연구는 우리나라의 갯녹음 해역에서 우점하는 무절산호조류 두 종, 납작돌잎과 진분홍딱지 배아가 1) 암조건에 대한 내성이 있고 낮은 조도에서 빠른 성장을 보이는지? 그리고 2) 저염분에 대한 내성이 약하고 건조 및 일장에 대하여 종별 특이성을 보이는지?에 대한 생리적 특성을 파악하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

본 연구를 위해 납작돌잎은 강원도 삼척시 원덕읍 갈남 해안

($37^{\circ}16' N$, $129^{\circ}19' E$)에서 2011년 10월에, 그리고 진분홍딱지는 전북 부안군 격포 해안($35^{\circ}36' N$, $126^{\circ}28' E$)에서 11월에 채집되었으며, 현장에서 해수가 담긴 샘플통에 넣고 ice box에 담아 실험실로 운반하였다. 각 종이 피복된 작은 돌은 실험실에서 착생한 동·식물을 실험용 메스로 제거하고 여과해수($0.45 \mu m$)와 brush로 표면에 부착된 미세조류를 수회 세척하여 절단된 슬라이드글라스 조각($2.5 \times 2.5 cm$)이 바닥에 깔린 Petri dish (직경 12 cm)에 각 종이 피복된 돌을 올리고 멸균해수가 들어있는 2 L 수조에 넣어 배양기에서 포자방출을 유도하였다(Song et al., 2013). 배양기의 온도는 Song et al. (2013)에 따라서 납작돌잎은 $10^{\circ}C$, 진분홍딱지는 $20^{\circ}C$ 로 다르게 세팅하였으며 염분(34 psu)과 조도($50 \mu mol photon m^{-2} s^{-1}$)와 광주기(12:12h LD)는 동일하게 유지시켰다. 배양기에서 48 h 동안 포자 방출을 유도한 후 슬라이드 조각에 부착된 배아를 환경조건별 배아의 성장 실험에 사용하였다.

조도 실험

각 종의 포자가 부착된 슬라이드 조각 3-4개를 산화게르마늄(GeO_2 , $5 mg L^{-1}$)이 첨가된 PES 배양액(Provasoli, 1968) 이 30 mL씩 담긴 Petri dish (직경 10 cm)에 넣었다. 배아가 들어있는 Petri dish는 5개의 조도(10, 50, 80, 120, $150 \mu mol photon m^{-2} s^{-1}$), 그리고 온도($20^{\circ}C$), 염분(34 psu)과 광주기(12:12h LD)는 동일하게 조절된 배양기에서 14일간 배양하였다. 저조도($10 \mu mol photon m^{-2} s^{-1}$)는 Petri dish를 검은색 망으로 감싸서, 그리고 고조도($120, 150 \mu mol photon m^{-2} s^{-1}$)는 배양기 내의 광원인 형광등과 Petri dish의 거리를 조절하여 만들었으며 디지털 조도계(DX-200)로 측정 후 Olla et al. (2000)의 방법으로 광(Lux)을 조도($\mu mol photon m^{-2} s^{-1}$)로 변환($1 \mu mol photon m^{-2} s^{-1} = ca. 51.17 Lux$)하였다. 배아는 광학현미경(Olympus BH-2, Japan) 하에서 7일 간격으로 관찰하였으며, 디지털카메라(Canon IXUS 860IS) 촬영하여 Image J 프로그램(1.40s, National Institute of Health, Bethesda, USA)으로 실험구별로 배아 30개체의 면적을 측정하고, 상대생장률은 아래의 식으로 계산하였다(Ichiki et al., 2000). 배양액은 2일 간격으로 교환하였으며, 이때 발견된 오염물질은 유화용 붓으로 제거하였으며 조도별로 3개의 반복구를 두었다.

$$RGR = 100(\ln A_2 - \ln A_1) / (T_2 - T_1),$$

A_1 , 실험 개시 때 배아면적; A_2 는 측정 시 배아면적, T_1 , T_2 는 배양 일수

암조건에 대한 2종 배아의 생존 반응을 확인하기 위하여, 위와 동일한 배양 방법으로 실험을 실시하였으며, Petri dish는 알루미늄 호일로 밀봉하여 광을 차단하였다. 배아는 21일 동안 $20^{\circ}C$, 34 psu와 12:12h LD로 세팅된 배양기에서 배양하면서 3일 간격으로 암조건 노출기간에 따른 배아의 생존반응을 확인하였으며 기간별로 3반복구를 두었고 반복구별로 배아 30개체의 면적을 측정하였다.

Table 1. Average RGR (% day⁻¹) of *Lithophyllum yessoense* and *Hildenbrandia rubra* sporelings grown at various irradiance levels for 7 and 14 days. Culture conditions were 20°C, 34 psu, and 12:12 h LD. Values are means ± SE (n=3 replicates)

Species	Culture period (day)	Irradiance (μmol photon m ⁻² s ⁻¹)				
		10	50	80	120	150
<i>L. yessoense</i>	7	9.31±1.80 ^a	12.41±0.81 ^a	12.51±0.26 ^a	11.69±0.64 ^a	9.66±0.68 ^a
	14	11.67±1.74 ^a	16.25±0.21 ^b	17.00±0.54 ^b	16.37±0.34 ^b	15.95±0.65 ^a
<i>H. rubra</i>	7	7.16±0.19 ^a	7.94±0.03 ^{ab}	9.96±0.24 ^b	6.50±1.03 ^a	6.41±0.61 ^a
	14	11.09±0.27 ^a	15.33±1.02 ^{bc}	15.79±0.60 ^c	11.67±1.08 ^{abc}	11.31±0.66 ^{ab}

^{a-c} Different superscript letters within rows represent significant differences between treatments (Tukey HSD test, $P < 0.05$).

일장 실험

일장(daylength)이 2종의 배아 성장에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 4개의 다른 일장(8, 12, 14, 16 h)과 동일한 온도(20°C), 염분(34 psu), 조도(50 μmol photon m⁻² s⁻¹)로 조절된 배양기에서 14일 동안 배양하였다. 배아의 생장은 7일 간격으로 배아 30개체의 면적을 측정하고 후 상대성장률을 계산하였으며 3개의 반복구를 두었다.

염분 실험

두 종의 배아 성장에 대한 염분의 영향을 확인하기 위하여, 배아가 부착된 슬라이드글라스를 PES 배양액이 담긴 Petri dish에 넣어서 14일 동안 배양하면서 7일 간격으로 배아의 면적을 측정하여 상대성장률을 계산하였다. 실험구별로 배아 30개체의 면적을 측정하였으며 3회 반복 실험을 실시하였다. 배양기의 온도(20°C), 조도(50 μmol photon m⁻² s⁻¹) 및 광주기(12:12h LD)는 동일하게 세팅하였으며 염분은 20, 27, 34 psu로 다르게 하였다. 저염분의 실험구는 멸균해수에 1차 증류수를 첨가하여 염분계(Atago, S/Mill-E)로 확인하며 해수의 염분 농도를 낮춘 후 배양액을 만들어 사용하였다.

건조 실험

무절산호조류 배아의 건조에 대한 내성을 비교하기 위하여, 슬라이드글라스 조각에 부착된 포자는 실험 전에 계수하여 각각 건조 시간이 라벨된 Petri dish에 넣어 배양액이 공급되지 않은 상태로 배양기 안에서 넣었다. 이때 배양기는 20°C, 50 μmol photon m⁻² s⁻¹과 12:12h LD로 세팅되었으며, 건조 기간은 0, 10, 20, 30, 40, 80 minute로 다르게 하였다. 배아는 건조 후에 GeO₂ (5 mgL⁻¹)가 포함된 PES 배양액(30 mL)이 담긴 Petri dish로 이동시켜서 건조시킬 때와 동일한 조건에서 3일 동안 배양하면서 배아의 회복 정도를 확인하였다. 배양 3일 후 광학현미경 하에서 회복되지 않고 사망한 배아를 계수하였고 실험 개시 전 배아 개체수와 비교하여 사망률을 계산하였다. 배아 면적의 50% 이상이 분홍색에서 하얀색으로 변한 것을 사망한 배아로 판정하였다.

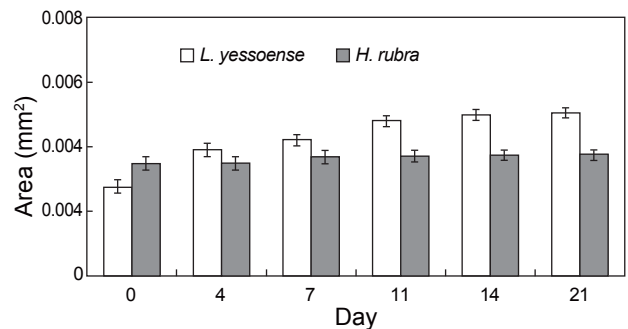


Fig. 1. Average surface area of *Lithophyllum yessoense* and *Hildenbrandia rubra* sporelings cultured at darkness over 21 days. Culture condition was 20°C and 34 psu. Vertical bars indicate standard errors (n=30).

통계분석

조도, 일장과 염분이 납작돌잎과 진분홍딱지 배아의 성장과 건조가 배아의 사망에 미치는 영향을 파악하기 위한 통계분석은 Cochran's test로 등분산검정(homogeneity of variances)을 실시하여 데이터의 동질성을 확인한 후, two-way ANOVA test로 유의차를 검정하였고, 평균에 대한 유의차가 발견되면 Tukey's HSD test 방법으로 사후 검정을 실시하였다(Sokal and Rohlf, 1995). 데이터 분석을 위해 사용된 통계 프로그램은 STATISTICA version 5.0 이었다.

결 과

조도 영향

무절산호조류 포자는 1일 후 부착하였으며, 실험 개시 전에 배아 면적은 납작돌잎이 0.0027 mm² (n=30 sporelings)였고 진분홍딱지는 0.0035 mm² (n=30 sporelings)로서 진분홍딱지 배아가 약간 컸다. 암조건에서 납작돌잎의 일부 배아는 세포분열 없이 붉은색을 띠다가 점차 탈색되어 21일 이후에는 하얗게 사멸하였으나 생존한 배아는 분열하여 0.0050 mm² (n=30 sporelings)까지 꾸준히 증가하였다(Fig. 1). 하지만, 반복구별 생존한

Table 2. Results of two-way ANOVA and Tukey HSD tests for the effects of irradiance on RGRs (% day⁻¹) of the two species, *Lithophyllum yessoense* and *Hildenbrandia rubra* sporelings grown at various irradiance levels

Factor	df	MS	F	P	MS	F	P
		Day 7			Day 14		
Species	1	92.99	41.83	< 0.01	43.56	17.17	< 0.001
Irradiance	4	10.89	4.90	< 0.01	23.49	9.26	< 0.001
Interaction	4	2.46	1.11	0.38	6.46	2.55	0.07
Residuals	20	2.22			2.54		

Tukey test ($P=0.05$)

Irradiance Day 7: 10=50=120=150 < 80, 50=80=120

Day 14: 10=120=150 < 50=80, 50=120=150, 80=120

배아는 많지 않아서 3개 반복구 자료를 통합하였으며, 이로 인하여 통계처리가 불가능하였다. 한편, 진분홍딱지의 모든 배아는 세포 분열되지 않았고 배양 초기부터 하얗게 탈색된 배아가 나타나기 시작하였고 배양 21일 이후에는 대부분의 배아가 사멸하였다.

납작돌잎의 배아는 10-150 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 다양한 조도에서 생장이 가능하였으며, 배양 7일 후에 배아 면적은 0.011-0.016 mm^2 였고, 14일 후에는 0.015-0.030 mm^2 으로 80 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 최대였다. 납작돌잎의 상대성장률은 배양 7일에 9.31-12.51% day^{-1} , 14일에는 11.67-17.00% day^{-1} 로 80 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 최대값을 보였다(Table 1). 납작돌잎의 조도별 상대성장률은 배양 7일 후에 차이가 없었으나, 14일 후에 유의차를 보였다($P<0.05$). 납작돌잎 배아는 저조도(10 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$)와 고조도(150 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$)에 비해 50-120 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 조도 범위에서 빠른 성장을 보였다(Tukey HSD test, $P<0.05$, Table 1). 한편, 진분홍딱지 배아 면적은 배양 7일 후에 0.009-0.014 mm^2 였고 14일 후에 0.016-0.032 mm^2 로 80 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 최대였다. 진분홍딱지의 상대성장률은 배양 7일에 6.41-9.96% day^{-1} ($P<0.01$), 14일에는 11.09-15.79% day^{-1} ($P<0.01$)로 조도별 차이가 확인되었으며, 80 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 최대였다(Table 1).

납작돌잎 배아의 성장률은 배양 7일과 14일 후에 모두 유의차가 나타났으며, 납작돌잎이 진분홍딱지에 비해 실험조도에서 성장률에 빠른 것으로 확인되었으나, 성장을 위한 최적 조도는 80 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 동일하였다(Table 2).

일장 영향

납작돌잎과 진분홍딱지의 배아는 8-16 h의 일장에서 성장하였으며, 배아 생장에 최적 일장은 납작돌잎이 16 h, 진분홍딱지가 14 h였으며 두 종 모두 단일 조건에 비해 장일 조건에서 빠른 성장을 보였다(Fig. 2A, B). 배양 7일 후에 납작돌잎은 진분홍

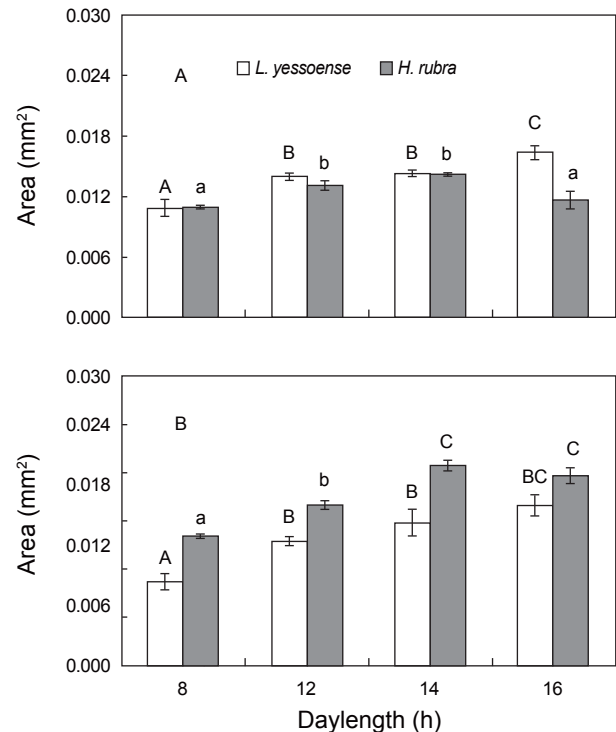


Fig. 2. Effects of daylength on the growth of *Lithophyllum yessoense* and *Hildenbrandia rubra* sporelings. Sporelings were cultured for 7 days (A) and 14 days (B) under 20°C, 34 psu, and 50 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Vertical bars indicate standard errors (n=3 replicates). A-C, a-c Different letters indicate significant difference between treatments (Tukey HSD test, $P<0.05$).

딱지에 비해 빠른 성장을 보였으나(Two-way Anova, $P<0.05$), 배양 14일 후에는 반대로 진분홍딱지 배아가 납작돌잎에 비해 빠른 성장을 보였다(Two-way Anova, $P<0.05$).

납작돌잎의 배아 면적은 배양 7일 후 16 h에서 0.016 mm^2 로

Table 3. Average RGR (% day⁻¹) of *Lithophyllum yessoense* and *Hildenbrandia rubra* sporelings grown at various salinity levels for 7 and 14 days. Culture conditions were 20 °C, 50 μmol photon m⁻² s⁻¹, and 12:12 h LD. Values are means ± SE (n=3 replicates)

Species	Culture period (day)	Salinity (psu)		
		20	27	34
<i>L. yessoense</i>	7	7.41±0.58 ^a	9.03±0.15 ^b	9.91±0.33 ^c
	14	9.89±0.51 ^a	10.13±0.38 ^a	16.22±0.22 ^b
<i>H. rubra</i>	7	7.16±0.19 ^a	7.94±0.03 ^b	9.96±0.24 ^c
	14	*	*	16.07±0.19

*: Sporeling death
^{a-c} Different superscript letters within rows represent significant differences between treatments (Tukey HSD test, *P*<0.05).

최대였고 12, 14h와 16 h에서는 배양 초기 배아의 면적에 비해 5배 증가하였으며(Fig. 2A), 상대성장률은 9.80-12.75% day⁻¹였다. 납작돌잎의 일장별 성장률은 배양 7일 후에 유의차를 보였으며(*P*<0.05), 사후 검정(Tukey HSD test)결과, 긴 일장 (16 h>14 h>12 h>8 h)에서 생장이 좋은 것으로 나타났다(Fig. 2A). 배양 14일에 배아면적은0.017-0.033 mm²의 범위로 16 h에서 가장 잘 자랐고 14, 12, 8 h의 순서로 나타났고 이를 근거로 한 상대성장률은 13.10-17.81 % day⁻¹였다(Fig. 2B). 또한, 일장별 성장률은 배양 14일 후에 유의차가 있었으며(*P*<0.05), 단일조건(8 h)에 비해 장일조건(12, 14, 16 h)의 일장에서 빠른 성장을 보였다(Tukey HSD test, *P*<0.05).

진분홍딱지의 배아 면적은 배양 7일에 14 h에서 최대였고 (0.014 mm²), 8 h에서 0.011 mm²로 최소였으며(Fig. 2A), 배아의 상대성장률은 9.89-11.74% day⁻¹로 중일조건(12 h=14 h)에서 단·장일(8 h=16 h)에 비해 높게 나타났다(Tukey HSD test, *P*<0.05). 또한, 진분홍딱지 배아는 배양 14일 후에 14 h (0.041 mm²)와 16 h (0.039 mm²)에서 좋은 성장을 보였으며(Fig. 2B), 상대성장률은14.55-17.68% day⁻¹로서 8 h와 12 h에 비해 14 h와 16 h의 일장 조건에서 빠른 성장을 보였다(Tukey HSD test, *P*<0.05).

염분 영향

무절산호조류 두 종의 배아는 모두 배양 7일까지 20, 27과 34 psu에서 유사한 성장 패턴을 보이다가 7일 이후 저염분에서 배아의 생장은 급감한 후 일부 배아가 사멸했다. 납작돌잎의 배아 면적은 7일 후 0.008-0.011 mm²였고 상대성장률은 7일에 7.41-9.91 % day⁻¹로서 염분별 차이(34 psu > 27 psu > 20 psu)를 보였다(Table 3). 또한, 14일 후에 납작돌잎 배아면적은 0.011-0.027 mm²였으며, 성장률은 9.89-16.22 % day⁻¹로서 20 psu와 27 psu에서는 차이가 없었으나 34 psu에서 빠른 성장을 보였다

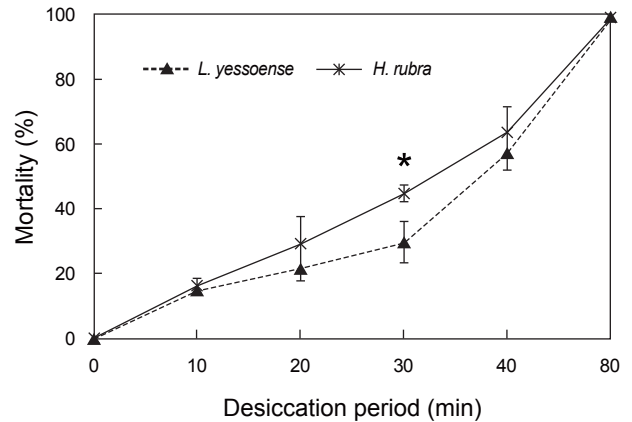


Fig. 3. Effects of desiccation period on the mortality of *Lithophyllum yessoense* and *Hildenbrandia rubra* sporelings. Sporelings were exposed into air from 10 to 80 minutes and cultured for 3 days under 20 °C, 50 μmol photon m⁻² s⁻¹, and 12:12h LD. Vertical bars indicate standard errors (n=3 replicates). * indicates significant difference in mortality between the two species at 30 minute desiccation period (One-way Anova, *P*<0.05).

(Table 3). 진분홍딱지 배아는 배양 7일까지는 모든 염분 실험구 (20, 27, 34 psu)에서 성장하였고 사후검정(Tukey HSD test)의 결과는 염분별 성장률의 차이가 있음을 나타냈다(Table 3). 하지만, 진분홍딱지 배아는 배양 11일 이후 20 psu와 27 psu에서 사멸하였다. 배양 14일 후, 생존한 배아는 34 psu에서만 관찰되었으며 이때 배아면적은 0.033 mm²였고 상대성장률은 16.07 % day⁻¹이었다(Table 3).

건조 영향

납작돌잎과 진분홍딱지 배아의 사망률은 80분의 대기 노출 후 약 99%였으며, 건조 기간에 비례하여 증가하였다(Fig. 3). 납작돌잎 배아의 사망률은 10-40분의 건조 기간에는 진분홍딱지의 배아에 비해 상대적으로 낮은 사망률을 보였으며, 이때 사망률은 납작돌잎이 15.09-57.30%였으며 진분홍딱지는 16.45-63.55%로 확인되었다(Fig. 3). 배아단계에서 납작돌잎은 진분홍딱지에 비해 높은 사망률을 보여 건조에 대한 내성이 낮은 것으로 확인되었으나(*P*<0.05), 2종의 배아 사망률은 건조 30분 후에 가장 차이가 있는 것으로 나타났다(Fig. 3).

고찰

본 연구에서 납작돌잎(*Lithophyllum yessoense*)과 진분홍딱지(*Hildenbrandia rubra*) 배아의 생장은 배양 7일과 14일 후에 모두 80 μmol photon m⁻² s⁻¹에서 가장 빨랐으며, 이보다 낮거나 높은 조도에서 생장은 지연되었다. Hwang et al. (2002)은 납

작돌잎 배아는 20-100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 성장하였으며 50 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 최대 성장을 보여 본 연구와 유사하였으나, Ichiki et al. (2000)은 실험조도(0.04-240 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 중에서 240 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 최대 성장을 보인다고 하여 본 연구 및 Hwang et al. (2002)의 결과와는 구별되는 성장반응을 보였다. 얼음에 덮힌 Greenland의 수심 15-40 m에 서식하는 *Phymatolithon foecundum*와 *P. tenue*는 13-17 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 낮은 포화조도에 적응되어 있으며(Kuhl et al., 2001; Roberts et al., 2002), Johansen (1981)은 다양한 석회조류가 저조도에서 최대 생장이 일어난다고 하였다. 아한대에서 서식하는 대부분의 무절산호조류의 성장을 위한 포화조도는 11.2-16 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이고 어떤 종은 대략 0.56-1.6 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 매우 낮았다(Adey, 1970). 한편, 열대 산호초해역에 서식하는 *Hydrolithon onkodes*와 일부 무절산호조류는 200-600 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 광포화가 일어나지만(Payri et al., 2001), 대부분의 무절산호조류와 유절산호조류(예, *Corallina mediterranea*와 *Jania rubens*)는 저조도에서 빠른 성장을 보였다(Hader et al., 1996). 또한, 무절산호조류는 조간대에 비해 상대적으로 광량이 적은 조하대, 혹은 조간대와 조하대에 서식하는 대형 해조류의 수관부(canopy) 아래와 같은 그늘진 곳에서 주로 서식하는 것으로 확인되었다(Johnson, 1984; Johnson and Mann, 1986). Ichiki et al. (2000)은 납작돌잎은 일본 북해도 해역의 다시마 수관부에서 잘 자라며, 80% 이상의 배아가 10.6 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 저조도에서 생존하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 납작돌잎의 일부 배아는 암조건에서 3주 이상 생존 및 성장하는 것으로 확인되었다. Wilson et al. (2004)은 Maërl의 성체는 암조건에 4주 동안 있어도 광합성에 큰 차이가 없다고 하여 배아와 성체가 암조건에 대한 내성은 매우 큰 것으로 판단된다.

또한, 납작돌잎과 진분홍딱지의 배아는 모두 단일 조건에 비해 장일 조건에서 빠른 성장을 보였으나, 최대 생장은 납작돌잎은 명기 16 h에서, 진분홍딱지는 명기 14 h로 종별 차이를 보였다. 일본 북해도에 서식하는 납작돌잎의 배아는 10 h와 12 h의 일장에 비해 14 h의 일장에서 빠른 성장을 보였고(Ichiki et al., 2000), Gao et al. (1993)은 유절산호조류인 *Corallina pilulifera*의 실내 배양에서 석회화율은 암기(dark period)에 비해 명기(light period)에 증가한다고 하여 각상형 산호조류의 생장은 낮은 조도에서 그러나 일장이 길어진 여름철이 주로 일어난다고 할 수 있다.

납작돌잎과 진분홍딱지의 배아는 모두 저염분(실험 염분 20, 27, 34 psu)에서 생장이 감소하는 패턴을 보였지만, 저염분에 대한 내성은 납작돌잎이 진분홍딱지에 비해 강한 것으로 확인되었다. 선행연구에서 한국산 납작돌잎(*L. yessoense*)의 배아 성장은 34 psu (0-43 psu에서 실험)에서 최대였으며, 25와 43 psu에서는 생장이 지연되었으나, 17 psu 이하에서는 배아가 사멸되어(Hwang et al., 2002), 본 연구의 결과와 비슷하여 우리나라

연안의 납작돌잎은 서식장소가 달라도 염분에 대한 성장 반응은 유사한 것으로 확인되었다. 또한, Maërl인 *Phymatolithon calcareum*의 성체는 3 psu, 15 psu, 그리고 30 psu에서도 광합성율이 감소하였으며(Lüning, 1990; Wilson et al., 2004), 동일 종에 대한 석회화율도 온도-염분의 상호작용에 의해 결정되지만 특히 저염분에서 빠르게 감소되어 염분의 영향이 더 크다는 것을 보고하였다(King and Schramm, 1982). 하지만, Notoya (1976)는 *Lithophyllum neofarlowii*의 생장의 최적 염분농도는 49 psu라고 하였으며 다른 몇몇 종들은 50 psu에서 서식하고 있다고 하였는데 이는 대부분의 무절산호조류 생장은 저염분에서 지연되지만 성장을 위한 최적 염분은 종별로 차이가 있는 것으로 판단된다.

무절산호조류는 직립형 해조류와는 다르게 저서 바닥에 각상형으로 부착하여 자라며 평균해수면 아래에 주로 서식하기 때문에 건조(desiccation)에 매우 민감하게 반응한다(Wilson et al., 2004). Maërl을 형성하는 *Phymatolithon calcareum*의 광합성 효율은 건조 기간에 지속적으로 감소하여 15분 경과 후 50% 감소하였고 광합성 기간은 30분을 넘지 못하였다(Wilson et al., 2004). 본 연구에서도 각상형 홍조류인 납작돌잎과 진분홍딱지의 배아는 30분의 건조 실험구에서 30%의 사망률을 보였으며, 80분 건조 시에는 대부분 사멸함으로써 건조는 무절산호조류 배아의 생존에 직접적인 영향을 미치며 다른 환경요인에 비해 치명적인 것으로 판단된다.

무절산호조류는 느린 성장(<1 cm yr^{-1})을 보이지만 자연상태에서 지속적으로 관찰되는 기능적 그룹이며, 본 연구에서 사용한 진분홍딱지의 최대생장은 1.2 mm yr^{-1} 로서 납작돌잎 속(genus) *Lithophyllum imprepressum*의 5.0 mm yr^{-1} 에 비해 느린 성장을 보였지만, Dethier and Steneck (2001)은 진분홍딱지는 섭식 피해(damage)에 대한 재생력을 가진다고 보고하였다. 본 연구에서도 Song et al. (2013)의 연구결과에서 진분홍딱지의 최적 성장온도인 20°C에서 납작돌잎 배아의 성장을 비교하였으나, 다양한 조도(0-150 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 일장(8-16 h), 염분(20-34 ppt)에서 납작돌잎의 배아 생장이 높게 나타남으로써 진분홍딱지는 다른 각상형 무절산호조류에 비해 배아 및 성체 단계에서 생장이 느린 것으로 확인되었다.

결론적으로 우리나라 갯녹음 해역에서 관찰되는 납작돌잎은 암조건에서 배아가 3주 이상 생존하며 진분홍딱지에 비해 염분과 건조에 대한 내성이 좋고 다른 종에 비해 빠른 성장을 보이는 것으로 확인되었다. 또한, 선행연구에서 납작돌잎은 연중 생식기집을 형성하고 포자 방출기간(1-3월 제외)이 길며, 고온과 높은 조도에서도 높은 생산성을 보이고, 표층세포의 박리를 통하여 다른 해조류 배아의 부착을 억제하고 조식동물의 유생을 착생시키는 특성(Masaki et al., 1981, 1984; Noro et al., 1983; Morse and Morse, 1984)을 가지고 있어서 갯녹음 해역에서 주로 관찰되는 것으로 사료된다. 본 연구에서 진분홍딱지는 납작돌잎에 비해 암조건, 염분, 건조와 같은 환경변화에 대한 적응

력과 성장에 의한 경쟁력은 상대적으로 낮지만, 여전히 암조건과 건조 내성은 좋아서 환경변화가 심하고 부유 퇴적물이 많아 탁도가 높은 서해안에서 번무하는 것으로 사료된다. Dethier and Steneck (2001)은 진분홍딱지는 상처에 대한 재생력이 다른 종에 비해 탁월하였으며, *Hildenbrandia* spp.는 광이 거의 도달하지 않는 따개비(barnacles)와 담치(mussels) 군락 아래에서도 수 년 동안 색소를 유지하며 생존한다고 보고하였는데, 우리나라 서해안에서 생장이 느린 진분홍딱지가 주로 관찰되는 것은 다양한 환경스트레스에 대한 내성이 다른 종에 비해 좋았기 때문으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구(과제번호 NRF-2011-0012519)로서 이에 감사 드립니다.

References

- Adey WH. 1970. The effects of light and temperature on growth rates in Boreal-subarctic crustose corallines. *J Phycol* 6, 269-276.
- Aegian CR, 1985. A biochemical ecology of *Porolithon gardneri*(Foslie). Ph.D. Thesis, University of Hawaii, Honolulu, U.S.A.
- Björk M, Mohammed SM, Björklund M and Semesi A. 1995. Coralline algae, important coral-reef builders threatened by pollution. *Ambio* 24, 502-505.
- Choi CG, Takeuchi Y, Terawaki T, Serisawa Y, Ohno M and Sohn CH. 2002. Ecology of seaweed beds on two types of artificial reef. *J Appl Phycol* 14, 343-349.
- DeBoer JA. 1981. Nutrients. In: *The Biology of Seaweeds*. Lobban CS and Wynne MJ, eds. Blackwell Science, Oxford, U.K., 356-392.
- Dethier MN and Steneck RS. 2001. Growth and persistence of diverse intertidal crusts: survival of the slow in a fast-paced world. *Mar Ecol Prog Ser* 223, 89-100.
- Fabricius K and De'ath G. 2001. Environmental factors associated with the spatial distribution of crustose coralline algae on the Great Barrier Reef. *Coral Reefs* 19, 303-309.
- Foster MS. 2001. Rhodoliths: Between rocks and soft places. *J Phycol* 37, 659-667.
- Gardner TA, Cote IM, Gill AB, Grant A and Watkinson AR. 2005. Hurricanes and Caribbean coral reefs : impacts, recovery patterns and role in long-term decline. *Ecology* 86, 174-184. <http://dx.doi.org/10.1890/04-0141>.
- Gao K, Aruga Y, Asada K, Ishihara T, Akano T and Miyohara M. 1993. Calcification in the articulated coralline alga *Corallina pilulifera*, with special reference to the effect of elevated CO₂ concentration. *Mar Biol (Berlin)* 117, 129-132.
- Hader DP, Herrmann H, Schafer J and Santas R. 1996. Photo-synthetic fluorescence induction and oxygen production in coralline algae measured on site. *Bot Acta* 109, 285-291.
- Harrington L, Fabricius K, Eaglesham G and Negri A. 2005. Synergistic effects of diuron and sedimentation on photosynthesis and survival of crustose coralline algae. *Mar Pollut Bull* 51, 415-427. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.10.042>.
- Hwang EK, Kim EJ, Kim HG and Sohn CH. 2002. Tetraspore release and growth of a crustose coralline alga, *Lithophyllum yessoense* (Rhodophyta, Corallinaceae). *J Korean Fish Soc* 35, 242-246.
- Ichiki S, Mizuta H and Yamamoto H. 2000. Effect of irradiance, water temperature and nutrients on the growth of sporelings of the crustose coralline alga *Lithophyllum yessoense* Foslie (Corallinales, Rhodophyceae). *Phycological Res* 48, 115-120.
- Johnson CR. 1984. Ecology of the kelp *Laminaria longicirris* and its principal grazers in the rocky subtidal of Nova Scotia. Ph.D. Thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Johnson CR and Mann KH. 1986. The crustose coralline alga, *Phymatolithon* Foslie, inhibits the overgrowth of seaweeds without relying on herbivores. *J Exp Mar Biol Ecol* 96, 127-146.
- Jokiel PL, Rodgers KS, Kuffner IB, Andersson AJ, Cox EF and Mackenzie FF. 2008. Ocean acidification and calcifying reef organisms: a mesocosm investigation. *Nat Geosci* 1, 114-117. <http://dx.doi.org/10.1007/s00338-008-0380-9>.
- King RJ and Schramm W. 1982. Calcification in the maerl coralline alga *Phymatolithon calcareum*, effect of salinity and temperature. *Mar Biol* 70, 197-204.
- Kuffner IB, Andersson AJ, Jokiel PL, Rodgers KS and Mackenzie FT. 2008. Decreased abundance of crustose coralline algae due to ocean acidification. *Nat Geosci* 1, 114-117. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo100>.
- Kuhl M, Glud RN, Borum J, Robert R and Rysgaard S. 2001. Photosynthetic performance of surface-associated algae below sea ice as measured with a pulse-amplitude-modulated (PAM) fluorometer and O₂ microsensors. *Mar Ecol Prog Ser* 223, 1-14.
- Littler MM. 1973. The population and community structure of Hawaiian fringing-reef crustose Corallinaceae (Rhodophyta, Cryptonemiales). *J Exp Mar Biol Ecol* 11, 103-120.
- Littler MM and Littler DS. 1985. Deepest Known plant life discovered on an uncharted seamount. *Science* 227, 57-59.
- Lobban CS and Harrison PJ. 1994. *Seaweed Ecology and Physiology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lüning K. 1990. *Seaweeds, Their Environment, Biogeography and Ecophysiology*. Wiley, New York, USA.
- Martin S and Gattuso JP. 2009. Response of Mediterranean coralline algae to ocean acidification and elevated temperature. *Glob Chang Biol* 15, 2089-2100. <http://dx.doi.org/10.1111/>

- j.1365-2486.2009.01874.x.
- Masaki TD, Fujita D and Akioka H. 1981. Observation on the spore germination of *Laminaria japonica* on *Lithophyllum yessoense* (Rhodophyta, Corallinaceae) in culture. Bull Fac Fish Hokkaido Univ 32, 349-356.
- Masaki T, Fujita D, and Hagen NT. 1984. The surface ultrastructure and epithallium shedding of crustose coralline algae in an 'Isoyake' area of southwestern Hokkaido, Japan. Hydrobiologia 116/117, 218-223.
- Maudsley B. 1990. Defenders of the reef. New Sci 126, 52-56.
- Morse ANC and Morse DE. 1984. Recruitment and metamorphosis of *Haliotis* larvae induced by molecules uniquely available at the surface of crustose red algae. J Exp Mar Biol Ecol 75, 191-215.
- Noro T, Masaki T and Akioka H. 1983. Sublittoral distribution and reproductive periodicity of crustose coralline algae (Rhodophyta, Cryptonemiales) in southern Hokkaido, Japan. Bull Fac Fish Hokkaido Univ 34, 1-10.
- Notoya M. 1976. On the influence of various culture conditions on the early development of spore germination in three species of the crustose corallines (Rhodophyta). Bull Jap Soc Phycol 24, 137-142.
- Olla BL, Davis MW and Rose C. 2000. Differences in orientation and swimming of walleye Pollock *Theragra chalcogramma* in a trawl net under light and dark conditions: concordance between field and laboratory observations. Fish Res 44, 261-266.
- Payri CE, Maritorea S, Bizeau C and Rodiere M. 2001. Photoacclimation in the tropical coralline alga *Hydrolithon onkodes* (Rhodophyta, Corallinaceae) from a French Polynesian reef. J Phycol 37, 223-234.
- Potin P, Floc'h JY, Augris C and Cabioch J. 1990. Annual growth rate of the calcareous red alga *Lithothamnion corallioides* (Corallinales, Rhodopyta) in the Bay of Brest, France. Hydrobiologia 204/205, 263-267.
- Provasoli L. 1968. Media and prospects for the cultivation of marine algae. In: Cultures and Collections of Algae. Watanabe A. and Hattori A, eds. Proceeding of the US-Japan Conference, Japanese Society for Plant Physiology, Tokyo, Japan, 63-75.
- Roberts RD, K  hl M, Glud RN and Rysgaard S. 2002. Primary production of crustose coralline red algae in a high Arctic Fjord. J Phycol 38, 273-283.
- Russell BD, Thompson JAI, Falkenberg LJ and Connell SD. 2009. Synergistic effects of climate change and local stressors: CO₂ and nutrient-driven change in subtidal rocky habitats. Glob Chang Biol 15, 2153-2162. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01886.x>.
- Semesi IS, Kangwe J and Bj  rk M. 2009. Alterations in seawater pH and CO₂ affect calcification and photosynthesis in the tropical coralline alga, *Hydrolithon* sp. (Rhodophyta). Estuar Coast Shelf Sci 84, 337-341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2009.03.038>.
- Sohn CH, Lee IK and Kang JW. 1986. Quantitative analysis of the structure and dynamics of benthic marine algal communities at the southern coast of Korea 1. Yonhwado near Chungmu. J Korean Fish Soc 19, 265-273.
- Sokal RR and Rohlf FJ. 1995. Biometry, 3rd Edition. Freeman, New York, U.S.A.
- Song JN, Park SK, Heo JS, Oh JC, Kim YS, Choi HG and Nam KW. 2013. Effects of temperature on the spore release and growth of *Lithophyllum yessoense* and *Hildenbrandia rubra*. Kor J Fish Aquat Sci 46, 296-302. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0296>.
- Steneck RS. 1997. Crustose corallines, other algal functional groups, herbivores and sediments: Complex interactions along reef productivity gradients. Proc. 8th Int, Coral Reef Symp 1, 695-700.
- Wilson S, Blake C, Berges JA and Maggs CA. 2004. Environmental tolerances of free-living coralline algae (m  erl): implications for European marine conservation. Biol Conserv 120, 283-293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2004.03.001>.