

쇠미역(*Costaria costata*)과 미역(*Undaria pinnatifida*) 배우체의 생장과 성숙에 광과 온도가 미치는 영향

나연주 · 전다빈 · 한수진 · Cyr Abel Ogandaga Maranguy · 안대성¹ · 차형기² · 이재봉³ ·
양재형⁴ · 이해원⁵ · 최한길*

원광대학교 생명과학부/기초자연과학연구소, ¹생태와 환경, ²국립수산과학원 연근해자원과, ³국립수산과학원 원양자원과,
⁴동해수산연구소 자원환경과, ⁵국립수산과학원 연구협력과

Crossed Effects of Light and Temperature on the Growth and Maturation of Gametophytes in *Costaria costata* and *Undaria pinnatifida*

Yeon Ju Na, Da Vine Jeon, Su Jin Han, Cyr Abel Ogandaga Maranguy, Dae Sung An¹, Hyung Kee
Cha², Jae Bong Lee³, Jae Hyeong Yang⁴, Hae Won Lee⁵ and Han Gil Choi*

Faculty of Biological Science and Institute for Basic Science, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

¹Institute of Eco and Environmental Incorporation, Bucheon 14501, Korea

²Coastal Water Fisheries Resources Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

³Distant Water Fisheries Resources Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

⁴Fisheries Resources and Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Gangneung 25435, Korea

⁵Research Cooperation Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

We examined for differences in the growth and fertility of microscopic stages between *Costaria costata* and *Undaria pinnatifida* in crossed temperature×irradiance (12, 17, 22°C×20, 60 μmol photons m⁻²s⁻¹) and daylength×irradiance (8, 12, 16, 24 h×20, 60 μmol photons m⁻²s⁻¹) experimental designs. After 13 days in culture, maximum gametophyte growths of the two species were obtained under the following combinations of factors: 17°C×60 μmol photons m⁻²s⁻¹ and 24 h daylength×60 μmol photons m⁻²s⁻¹. *C. costata* gametophytes produced sporophytes about 6 days earlier than those of *U. pinnatifida*. Sporophyte densities were highest in the 12 h daylength×60 μmol photons m⁻²s⁻¹ combination after 20 days in *C. costata* (9.7 plants mm⁻²) and 26 days in *U. pinnatifida* (9.1 plants mm⁻²). However, optimal growth conditions for the microscopic sporophytes differed between species: 17°C×60 μmol photons m⁻²s⁻¹ for *C. costata*, 12°C×60 μmol photons m⁻²s⁻¹ for *U. pinnatifida*. Thus, *C. costata* gametophytes grew faster and produced sporophytes earlier than those of *U. pinnatifida*, even though the haploid gametophytes of the two species responded similarly to environmental conditions. Optimal growth temperatures for the microscopic sporophytes also differed between species.

Key words: *Costaria costata*, Fertility, Growth, Gametophyte, *Undaria pinnatifida*

서 론

우리나라에서 양식 대상종인 쇠미역(*Costaria costata*)과 미역(*Undaria pinnatifida*)은 배우체와 포자체가 세대교번하는 생활사를 가지는 다시마목(Laminariales)의 일년생 대형 갈조류이다(Choi et al., 2007). 쇠미역은 짧은 줄기, 직립하는 엽

상(blade)과 엽상의 표면에 자낭반을 형성하는 종으로(Cho, 2010), 미역은 엽체의 중앙에 중륜(midrib)이 발달된 난원형 혹은 피침형 엽상, 그리고 줄기(stipe)의 하부에 포자엽(sporophyll)을 형성하는 나래미역과(Alariaceae)에 포함된다. 이처럼 두 종은 형태와 분류학적 차이가 있음에도 불구하고 채묘와 야외양성까지 동일한 방법으로 양식되고 있었다(Sohn, 2004).

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2016.0190>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Korean J Fish Aquat Sci 49(2) 190-197, April 2016

Received 26 February 2016; Revised 21 April 2016; Accepted 25 April 2016

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

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

Park et al. (2011)은 2종의 포자체 유엽(쇠미역, 4.8-5.9 mm; 미역, 5.8-9.5 mm)을 다양한 환경의 조합조건에서 배양한 결과, 미역에 비해 쇠미역이 모든 실험 온도(12, 17, 22℃)와 광도(2, 10, 20, 60, 100, 180 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)에서 빠른 성장을 보였으며 상대적으로 고온인 22℃에서도 생장이 좋았다. 또한, 포자체 유엽의 최대생장이 일어나는 온도·광도(17℃, 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)와 일장·염분(12 h, 35 psu)은 유사하였으나 생장은 쇠미역이 좋았고 저염분(15 psu)에 대한 내성은 미역이 오히려 좋았다. 미역 배우체의 성장과 성숙에 대한 환경요인(온도, 광도, 일장, 영양염, 착생밀도, 염분 등)의 영향에 대해서 많은 연구가 수행되었으나(Kim and Nam, 1997; Morita et al., 2003; Wu et al., 2004; Choi et al., 2005; Morelissen et al., 2013), 쇠미역 배우체의 성장과 성숙에 대한 환경요인의 영향에 대한 정보는 거의 전무한 실정이다.

오래 전부터 식용된 미역은 우리나라 전 해안에 서식하며, 1962년에 인공채묘가 시행되면서 해면양식이 가능하였고, 미역류(쇠미역 포함)의 생산량(생산금액)은 2014년 기준으로 약 28만 4천톤(708억원)으로서 우리나라 해조류 생산량의 25.66% (생산액의 13.93%)를 차지하며 김과 다시마에 이어 3위의 중요한 양식대상종이다(수산정보포탈, <http://www.fips.go.kr>). 또한, 쇠미역은 동해중부 이북의 수심 5-10 m에서 주로 서식하는 대표적 한해성 종으로서 미역에 비해 염체가 다소 짙고 딱딱하여 독특한 맛을 가지고 있어 샐러드로서 선호도가 높은 식용종이며, 갯녹음 해역의 해중립 복원에 활용 가능한 종으로서 양식기술개발을 통한 대량생산이 필요한 실정이다(Kim et al., 2006). 현재 갈조류 양식에서 사용하는 유주자 채묘방법은 자연개체군 훼손, 계통주(strain)의 열성화, 채묘시기의 제한, 채묘줄 관리의 고비용 발생 등 많은 단점이 있다(Wu et al., 2004; Wi et al., 2008; Hwang et al., 2010). 현미경적 크기의 암배우체는 중간 교잡(hybrid)과 종묘 배양에 필요하며(Pang et al., 1997; Morita et al., 2003; Wu et al., 2004; Choi et al., 2005; Druehl et al., 2005), 배우체를 이용한 채묘방법은 선발육종, 실내 보존 및 채묘시기 조절, 장기간 실내 종묘관리를 위한 고비용 절감, 자연 개체군 보호 등 많은 장점이 있다(Wu et al., 2004; Westermeier et al., 2006; Hwang et al., 2009; Xu et al., 2009; Hwang et al., 2010). 갈조류 다시마와 미역의 배우체 채묘방법(Wu et al., 1994; Kaas, 1998; Li et al., 1999; Wu et al., 2004; Xu et al., 2009)은 약 20년 전부터 시도되었으나, 배우체의 부착력이 좋지 않아서 아직 실용화 되지 못한 상태이다(Xu et al., 2009).

따라서, 본 연구는 온도, 일장과 광도가 양식 대상종인 갈조류 쇠미역과 미역의 생활사 초기 단계인 배우체의 성장과 성숙, 나아가 아포체의 형성과 성장에 미치는 영향을 파악하여 종묘배양의 기초자료를 활용하고 향후 배우체 채묘를 위한 종묘 확보를 위한 자료로 활용할 목적으로 수행되었다.

재료 및 방법

전남 장흥군 이회진항(34° 28' N, 126° 58' E) 인근에 위치한 양식장에서 2012년 5월에 자낭반이 형성된 쇠미역과 포자엽을 가진 미역의 포자체를 채집하여 현장에서 해수와 함께 샘플병에 넣은 후 아이스박스(5-10℃)에 담아 실험실로 운반하였다. 실험실에서 자낭반과 포자엽을 염체에서 분리한 후 여과해수와 멸균해수에서 붓으로 수회 세척하여 표면에 부착된 동물과 해조류를 제거하였다.

세척된 성숙한 자낭반과 포자엽은 각기 알루미늄 호일로 싸서 20℃의 항온실에서 음건한 후 멸균해수에 넣어 유주자 방출을 유도하였다. 쇠미역과 미역의 유주자액을 구분하여 슬라이드글라스 조각(1.5×2.5 cm)과 멸균해수가 담긴 Petri dish (Ø 9 cm)에 주사기로 각기 0.1 mL 씩 접종한 후 유주자가 슬라이드 조각에 착생하도록 17℃와 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 세팅된 배양기에서 12 h 유지하였다.

유주자가 부착된 슬라이드 조각을 PESI 배지(Tatewaki, 1966)가 30 mL씩 담긴 Petri dish (Ø 10 cm)에 3개씩 넣어 일장이 12 h로 고정된 배양기에서 다양한 온도(12, 17, 22, 27℃)×광도(20, 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)가 조합된 실험구에서, 그리고 온도가 17℃로 고정된 배양기에서 4개의 일장(8, 12, 16, 24 h)×2개 광도(20, 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)의 조합에서 3개의 반복구를 두어 13일간 배양하였다. 배양기내의 광원은 형광등이었으며, 광도는 배양용기를 검은색 망으로 덮어 조절하였으며 디지털조도계(DX-200)로 광도를 측정하였다. 배양액은 실험기간 동안 3일 간격으로 전량 교환하였으며 규조류의 성장을 억제하기 위하여 배양액에 GeO_2 (5 mg L^{-1})를 첨가하였다(Shea and Chopin, 2007). 두 종의 배우체 생장은 현미경에 부착된 디지털 카메라로 촬영한 후에 반복구별로 각 20개체씩을 무작위로 선택하여 Image J 프로그램으로 길이를 측정하였다. 두 종의 생장은 암배우체 길이와 상대성장률(RGR, relative growth rate)로 비교하였으며, 상대성장률은 착생된 유주자와 배양 13일 후의 암배우체 길이를 이용하여 계산하였다(Serisawa et al., 2002).

$$\text{RGR} (\% \text{ day}^{-1}) = 100 \ln (L_2 - L_1) / T_2 - T_1$$

여기서 L_2 는 13일 후 암배우체 길이, L_1 은 착생 직후의 부동포자(embryospore) 길이를 말하며, $T_2 - T_1$ 은 배양 기간인 13일을 의미한다.

아포체의 밀도와 길이는 아포체가 형성되는 온도(12, 17, 22℃)×광도(20, 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)가 조합된 실험구와 일장(8, 12 h)×광도(20, 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)의 조합된 실험구에서 측정되었다. 두 종 배우체의 난(egg)과 아포체 형성시기가 다른 것으로 확인되어 쇠미역은 배양 개시 20일 후, 미역은 26일 후에 아포체의 밀도와 길이를 측정하였다. 각 종의 아포체 밀도는 반복구별 Petri dish (Ø 9 cm)에 놓여진 슬라이드 표면 4 mm^2 에 형성된 아포체를 계수하였고 cover glass로 덮어 사진

촬영한 후에 반복구별로 20개체를 무작위로 선택하여 길이를 측정하였다. 또한, 배양 26일 후, 최적 성장조건인 12 h, 17°C와 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 배양한 아포체를 가진 쇠미역과 미역의 배우체를 사진 촬영하여 세포 40개씩을 무작위로 선택하여 길이와 너비를 측정하고 2종을 비교하였다.

쇠미역과 미역의 배우체 성장, 아포체 밀도 및 성장에 대한 온도·광도와 일장·광도의 영향을 파악하기 위한 통계분석은 Cochran's test로 등분산검정(homogeneity of variances)을 실시하여 데이터의 동질성을 확인한 후, two-way ANOVA test로 유의차를 검정하였다. 평균에 대한 유의차가 발견되면, Tukey's HSD test방법으로 사후 검정을 실시하였다(Sokal and Rohlf, 1995). 자료의 통계 분석을 위해 사용된 프로그램은 STATISTICA version 5.0이었다.

결 과

배우체 성장

쇠미역과 미역의 암배우체는 3개 온도(12, 17, 22°C)와 2개 광도(20, 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)에서 성장하였으나, 27°C에서는 모든 광도에서 발아되지 않았으며, 배양 2일 후 사멸하였다(Fig. 1). 배양 13일 후, 쇠미역 암배우체의 길이는 119.67-

277.38 μm (RGR, 28.27-34.74 % day^{-1})로서 17°C에서 가장 빠른 성장을 보였고($F_{3,16}=972.10, P<0.001$), 광도의 경우에는 모든 온도 조건에서 20 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에 비해 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 생장이 좋았다($F_{1,16}=46.68, P<0.001$). 또한, 쇠미역의 배우체 생장은 온도와 광도의 상호작용에 의한 영향을 받는 것으로 확인되었으며($F_{3,16}=6.20, P<0.01$), 모든 온도에서 통계적인 유의차를 보였다(Tukey HSD test). 배양 13일 후, 미역 암배우체 길이는 138.21-235.90 μm (RGR, 29.38-33.50 % day^{-1})로 쇠미역과 마찬가지로 17°C에서 다른 온도에 비해 빠른 성장을 보였으며($F_{3,16}=1827.71, P<0.001$), 20 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에 비해 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 빠른 성장을 보였다($F_{1,16}=150.78, P<0.001$). 또한, 미역의 배우체 생장은 온도와 광도의 상호작용에 의한 영향이 받는 것으로 확인되었으며($F_{3,16}=20.26, P<0.001$), 모든 온도 실험구에서도 통계적인 유의차를 보였다(Tukey HSD test).

일장(8, 12, 16, 24 h)과 광도(20, 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 실험에서 쇠미역 암배우체의 길이는 144.14-329.19 μm (상대성장률 29.71-36.06 % day^{-1})로 연속광(24 h)에서 최대 성장을 보였고($F_{3,16}=265.10, P<0.001$), 20 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에 비해 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 빠른 성장을 보였다($F_{1,16}=52.15, P<0.001, \text{Fig. 2}$). 하지만, 미역의 배우체 생장은 일장과 광도의 상호작용에 의한 영향이 없는 것으로 확인되었으나($F_{3,16}=1.24,$

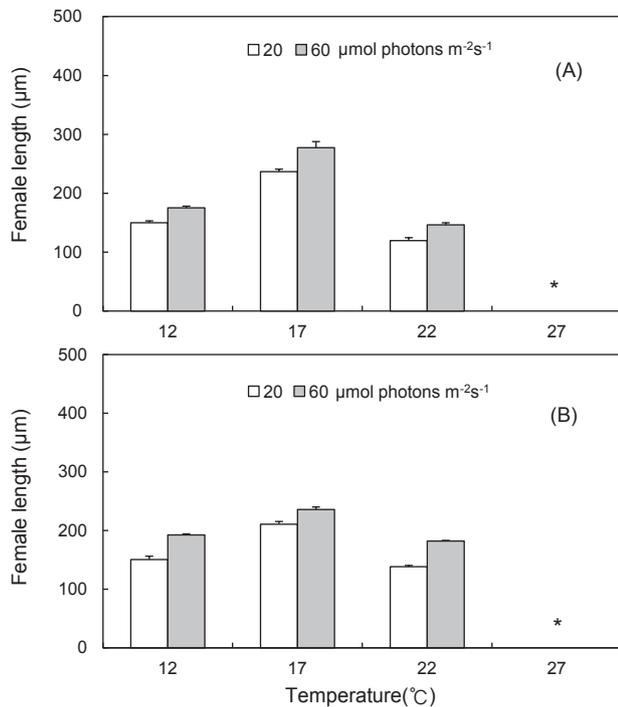


Fig. 1. Average female lengths of (A) *Costaria costata* and (B) *Undaria pinnatifida* gametophytes cultured for 13 days under various temperature and irradiance levels. Daylength was constant as 12h. Values represent mean \pm SE (n=3 replicates). *, no data

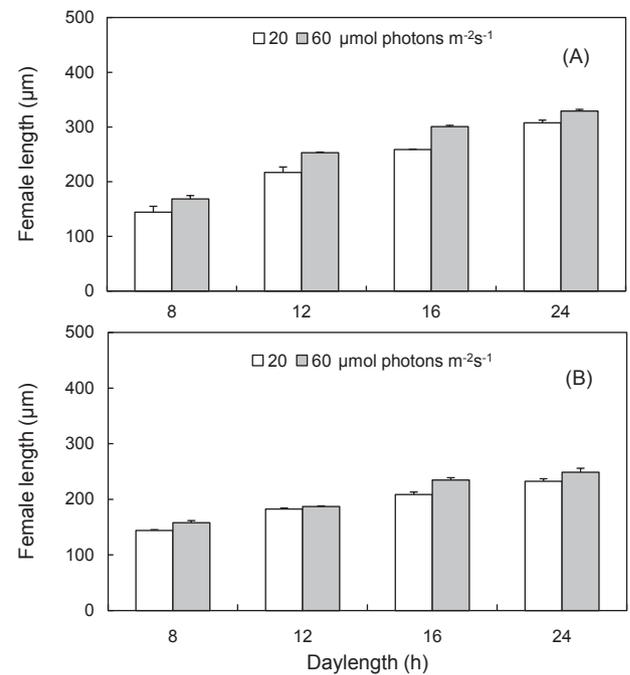


Fig. 2. Average female lengths of (A) *Costaria costata* and (B) *Undaria pinnatifida* gametophytes cultured for 13 days under four daylength and two irradiance levels. Temperature was constant as 17°C. Values represent mean \pm SE (n=3 replicates).

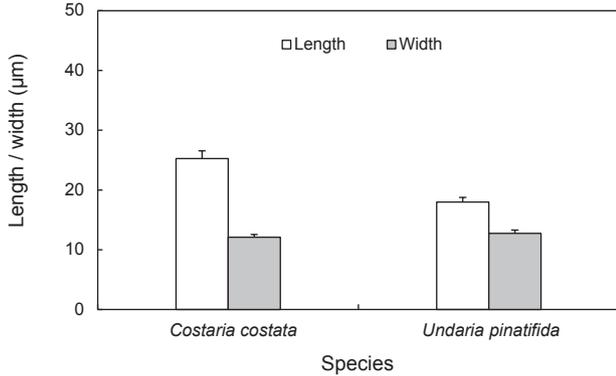


Fig. 3. Average cell lengths and widths of *Costaria costata* and *Undaria pinnatifida* female gametophytes having young sporophytes after 26 days in the same culture conditions of 12 h daylength, 17°C, and 60 µmol photons m⁻²s⁻¹.

$P=0.33$), 모든 일장 실험구에서는 통계적인 유의차를 보였다 (Tukey HSD test). 미역 암배우체의 길이는 143.95-248.90 µm (상대성장률 29.70-33.91 %day⁻¹)로서 쇠미역과 동일하게 연속광(24 h)에서 다른 일장에 비해 빠른 성장을 보였고 ($F_{3,16}=197.86, P<0.001$), 저광도(20 µmol photons m⁻²s⁻¹)에서 보다는 고광도(60 µmol photons m⁻²s⁻¹)에서 높은 성장을 나타냈다 ($F_{1,16}=28.57, P<0.001$). 하지만, 미역의 배우체 생장은 일장과 광도의 상호작용에 의한 영향을 없는 것으로 확인되었으나 ($F_{3,16}=2.36, P=0.11$), 모든 일장에서 통계적인 유의차를 보였다 (Tukey HSD test).

쇠미역과 미역의 배우체 단계에서 최적 성장조건은 17°C와 60 µmol photons m⁻²s⁻¹의 조합조건으로 동일하였으나 생장은 쇠미역이 미역에 비해 빠른 것으로 확인되었으며, 22°C에서는 모두 생장이 느리게 나타났다.

포자체 형성

종묘생산에 필요한 포자체의 형성 밀도는 2종의 포자체 형성 시기의 차이로 인해 20일(쇠미역)과 26일(미역) 배양 후에 측정하였다. 쇠미역 아포체의 밀도는 온도(12, 17, 22°C)와 광도(20, 60 µmol photons m⁻²s⁻¹)의 조합 실험구에서 3.2-9.8개체/mm²로 17°C의 60 µmol photons m⁻²s⁻¹에서 최대였다(Table 1). 미역의 아포체 밀도는 배양 26일 후에 3.2-9.1개체/mm²로 17°C의 60 µmol photons m⁻²s⁻¹에서 가장 높았다.

아포체가 생성되는 일장(8, 12, 16, 24 h)과 광도(20, 60 µmol photons m⁻²s⁻¹)가 조합된 실험구에서 쇠미역의 아포체 밀도는 12 h와 60 µmol photons m⁻²s⁻¹에서 9.7개체/mm²로 가장 높았으며, 일장 12 h를 기준으로 장일조건(16, 24 h)에서는 아포체가 형성되지 않았다(Table 1). 미역의 경우, 일장·광도의 실험구에서 아포체의 밀도는 12 h와 60 µmol photons m⁻²s⁻¹에서 9.3개체/mm²로 가장 높게 나타남으로써 쇠미역과 미역 모두 동일한 환경조건에서 아포체 형성이 높게 나타나는 것을 확인하였다.

포자체 성장

온도·광도의 조합조건에서 쇠미역 아포체의 길이는 배양 20일 후에 94.63-207.80 µm로 17°C와 60 µmol photons m⁻²s⁻¹

Table 1. Average density (plants/mm²) of young sporophytes that produced from *Costaria costata* and *Undaria pinnatifida* gametophytes grown under various temperature, daylength, and irradiance levels. Density was estimated after 20 and 26 days for *Costaria costata* and *Undaria pinnatifida*, respectively. Values represent mean ±SE (n=3 replicates)

Species	Irradiance (µmol photons m ⁻² s ⁻¹)	Temperature (°C)			Daylength (h)	
		12	17	22	8	12
<i>C. costata</i>	20	9.17±1.56	8.83±0.88	3.17±0.08	4.75±0.50	8.50±0.43
	60	7.42±0.65	9.75±0.90	4.17±0.42	7.75±0.52	9.67±0.79
<i>U. pinnatifida</i>	20	5.33±0.46	8.17±0.79	3.17±0.08	3.42±0.33	8.83±0.36
	60	7.83±0.98	9.08±0.42	3.67±0.68	4.67±0.55	9.33±0.55

Table 2. Average lengths(µm) of young sporophytes produced from *Costaria costata* and *Undaria pinnatifida* gametophytes grown under various temperature, daylength, and irradiance levels. Growth was measured after 20 and 26 days for *Costaria costata* and *Undaria pinnatifida*, respectively. Values represent mean ±SE (n=3 replicates)

Species	Irradiance (µmol photons m ⁻² s ⁻¹)	Temperature (°C)			Daylength (h)	
		12	17	22	8	12
<i>C. costata</i>	20	158.48±2.70	172.24±3.95	94.63±2.01	129.80±5.26	173.96±3.08
	60	197.09±6.11	207.80±3.35	104.95±4.23	185.43±1.88	218.31±6.88
<i>U. pinnatifida</i>	20	190.78±10.61	184.09±4.78	109.54±2.01	139.55±4.22	187.15±2.13
	60	334.73±16.26	201.68±2.33	148.92±1.38	143.57±5.38	203.97±3.84

에서 최대 생장을 보였고 미역 아포체의 길이는 배양 26일 후에 109.50-334.70 μm 로 쇠미역과 다르게 최대 생장은 12 $^{\circ}\text{C}$ 와 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 조합에서 일어났다(Table 2). 쇠미역과 미역의 아포체의 생장은 온도($F_{3,16}=1418.29, P<0.001, F_{3,16}=485.75, P<0.001$)와 광도($F_{1,16}=82.51, P<0.001, F_{1,16}=98.23, P<0.001$)의 영향을 받는 것으로 나타났다.

광도·일장의 조합조건에서 배양한 쇠미역 아포체의 길이는 배양 29일후에 129.80-218.31 μm 로서 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 와 12 h의 조합에서 생장이 최대였고 미역 아포체의 길이는 배양 26일 후에 139.60-204.00 μm 로서 쇠미역과 동일한 조건(60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 12 h)에서 최대생장을 보였다(Table 2). 쇠미역과 미역의 아포체 생장은 광도($F_{1,16}=113.49, P<0.001, F_{1,16}=6.57, P<0.001$)와 일장($F_{3,16}=1939.39, P<0.001, F_{3,16}=2412.50, P<0.001$)에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.

배양 26일 후, 2종의 최적 배양조건인 12 h, 17 $^{\circ}\text{C}$ 와 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 아포체를 형성하는 암배우체의 생장은 세포의 길이와 너비로 비교하였다. 쇠미역 암배우체 세포의 평균 길이는 25.27 \pm 8.06 μm (n=40 cells)이었고 너비는 12.11 \pm 2.79 μm (n=40)이었으며, 미역 암배우체 세포의 평균 길이는 17.99 \pm 4.95 μm (n=40 cells)이었고 너비는 12.74 \pm 3.41 μm (n=40)로 측정되었다. 쇠미역 암배우체의 세포 길이는 미역 세포에 비해 1.4배 큰 것으로 확인되었다.

고 찰

해조류의 종별 생장과 성숙 나이가 생물량, 수직분포와 수평분포는 온도, 광도 및 일장과 같은 무생물적 환경요인에 의해 결정된다(Choi et al., 2008; Oh et al., 2015). 또한, 동일종에서도 환경요인이 생장 및 성숙에 미치는 영향은 생활사 단계(배아, 성체)에 따라 다른 것으로 알려져 있으며(Kim et al., 2005; Kim et al., 2007a; Choi et al., 2008), 미역의 아포체(어린 포자체) 생장과 성체 생장은 다르게 나타났다(Saito, 1975). 미역과 같은 대형갈조류의 배우체 생장, 성숙과 아포체의 형성은 수온, 광량 및 일장과 같은 환경조건의 영향을 받는 것으로 알려져 있는데(Akiyama, 1965; Morita et al., 2003; Wu et al., 2004; Choi et al., 2005), 배우체 생장은 장일(16 h)과 연속광(24 h)에서 주로 일어나고 성숙은 단일 조건에서 유도되어 일장이 생장 및 성숙에 중요한 환경 요인으로 밝혀져 있다(Tseng et al., 1959; Akiyama, 1965; Lüning, 1981; Choi et al., 2005). 미역에 대한 선행연구에서, 배우체 최적 생장 온도는 17-20 $^{\circ}\text{C}$ 였으며, 20 $^{\circ}\text{C}$ 이상에서는 생장이 저조한 것으로 알려져 있으며(Saito, 1956; Kang and Koh, 1977), Kim and Nam (1997)은 12 h 일장의 다양한 온도(5, 17, 20, 25, 30 $^{\circ}\text{C}$)와 광도(20, 40, 60, 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)가 조합된 실내배양에서 북방형과 남방형은 모두 17 $^{\circ}\text{C}$ 의 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 빠른 생장과 성숙을 보였다고 하였다. 감태와 곱피의 유리배우체를 절편한 생장실험에서 최대 생장 조건은 15 $^{\circ}\text{C}$ 와 20 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로서 차

이가 없었으나(Wi et al., 2008; Hwang et al., 2010), 동일종인 곱피 배우체의 최적생장 온도는 15 $^{\circ}\text{C}$ (Hwang et al., 2010)와 25 $^{\circ}\text{C}$ (Kim et al., 2007a)로서 차이를 보였는데, 이러한 결과는 모조의 서식처(남해와 동해)의 수온차이 때문인지, 실험 개시전 실내배양 기간(50-60일)에 유리배우체가 저온에 적응되었기 때문인지 확실하게 밝혀지지 않았다(Table 3). 켈프종의 배우체 생장은 배양 환경에 따라 다르게 나타나지만, Wu et al. (2004)은 미역의 암·수배우체가 공존하면 배우자(정자, 난자)가 5-22 $^{\circ}\text{C}$ 에서 생성 및 방출되지만, 분리된 암배우체 클론은 25 $^{\circ}\text{C}$ (12:12h LD)에서 최대생장을 보였으며, 이때 생장률은 37.10 %day $^{-1}$ (80 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)와 38.60 %day $^{-1}$ (100 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)였다. 본 연구에서 2종(쇠미역과 미역) 암·수배우체가 공존하는 상태에서 최적 생장조건은 17 $^{\circ}\text{C}$ 의 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 동일하였으나, 최대생장 조건인 연속광에서 13일 배양한 암배우체 상대생장률은 쇠미역(36.06% day $^{-1}$)이 미역(33.91 %day $^{-1}$)에 비해 약간 높은 것으로 확인되었고 위에서 언급한 미역 암배우체 클론의 최적생장조건의 생장률과 차이가 거의 없었다.

본 연구에서 쇠미역과 미역의 배우체 생장은 일장과 비례하여 증가하였고, 정란기 형성은 정일(12 h)과 단일조건(8 h)에서 높게 나타남으로써 일장에 반비례함으로써 생장과 성숙에 대한 일장의 영향이 다름을 확인하였다. 선행연구에서도 미역 배우체의 최대 생장은 장일조건(16 h)에서, 최대 성숙은 12 h에서 일어남으로써 본 연구결과와 유사하였다(Choi et al., 2005). Liu et al. (2004)은 미역 암배우체의 난 방출(egg-discharge)은 11h일장(11:13h LD)에서 암조건이 시작된 5-15분 내에 발생한다고 하였으며, 연속광(24 h)으로 옮기면 난방출이 일어나지 않는다고 하여 배우체의 성숙은 장일조건과 연속광에서 일어나지 않는다는 본 연구 결과와 유사하였다. 갈조류 감태와 곱피 유리 배우체의 성숙실험(10, 12, 14 h)에서 감태는 단일조건에서(Wi et al., 2008), 곱피는 반대로 장일조건에서 빠르게 성숙하여 종별 차이를 나타냈다(Hwang et al., 2010). Tseng et al. (1959)은 다시마 배우체는 연속광에서 생장이 촉진되지만 성숙하지 않았다고 기록하였으며, Lüning (1981)은 다시마 배우체의 성숙은 연속광이나 장일조건에서는 억제되거나 낮다고 하였다. 따라서, 쇠미역에서도 일장은 배우체의 생장, 성숙과 아포체 형성에 매우 중요한 환경요인이라는 것을 확인할 수 있었다.

두 종의 배우체 생장과 성숙을 위한 최적 환경은 17 $^{\circ}\text{C}$, 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 12 h로서 동일하였으나, 아포체의 생장 적온은 쇠미역(17 $^{\circ}\text{C}$)이 미역(12 $^{\circ}\text{C}$)에 비해 높은 것으로 확인되었다. Saito (1975)는 미역 아포체가 15-17 $^{\circ}\text{C}$ 에서 생장이 좋다고 하였고, 최근에 수행된 연구에서 미역과 쇠미역 포자체 유엽(5-10 mm)은 17 $^{\circ}\text{C}$ 에서 최대생장을 보임으로써(Park et al., 2011), 쇠미역은 아포체와 유엽의 생장 적온은 동일하였으나, 미역은 약간의 차이를 보였다. 다시마목에 속하는 종들의 아포체 최적 생장 온도는 곱피가 20 $^{\circ}\text{C}$, 개다시마와 다시마가 10 $^{\circ}\text{C}$

Table 3. Optimal growth conditions in the microscopic gametophytes and sporophytes of various kelp species growing around the coastal areas of Korea. The tested environmental conditions represents in the parenthesis

Species	Temperature (°C)	Irradiance ($\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Daylength (h)	References
Gametophyte				
<i>Costaria costata</i>	17 (12, 17, 22, 27)	60 (20, 60)	24 (8, 12, 16, 24)	This study
<i>Undaria pinnatifida</i>	17 (12, 17, 22, 27)	60 (20, 60)	24 (8, 12, 16, 24)	This study
<i>Ecklonia cava</i>	15 (5, 10, 15, 20)	20 (5, 10, 20, 40)	14 (10, 12, 14)	Wi et al., 2008
<i>Ecklonia stolonifera</i>	15 (5,10,15, 20)	20 (5, 10, 20, 40)	12 (10, 12, 14)	Hwang et al., 2010
<i>Ecklonia stolonifera</i>	25 (5,10,15, 20,25)	20 (20, 40, 60, 80)	ND	Kim et al., 2007a
<i>Saccharina sculpera</i>	20 (5,10,15, 20,25)	40 (20, 40, 60, 80)	ND	Kim et al., 2007b
<i>Saccharina sculpera</i>	20 (5,10,15, 20,25)	40 (40, 80, 120)	ND	Kim et al., 2005
<i>Saccharina japonica</i>	20 (5,10,15, 20)	10 (10, 30, 70, 150)	ND	Kang and Koh, 1999
Sporophyte				
<i>Costaria costata</i>	17 (12, 17, 22)	60 (20, 60)	12 (8, 12)	This study
<i>Undaria pinnatifida</i>	12 (12, 17, 22)	60 (20, 60)	12 (8, 12)	This study
<i>Ecklonia stolonifera</i>	20 (10,15, 20,25)	20 (20, 40, 60, 80)	ND	Kim et al., 2007a
<i>Saccharina sculpera</i>	10 (5,10,15)	40 (40, 80, 120)	ND	Kim et al., 2005
<i>Saccharina japonica</i>	10 (5,10,15)	80 (40, 80, 120)	ND	Kim et al., 2005
<i>Saccharina japonica</i>	10 (5,10,15, 20)	70 (10, 30, 70)	ND	Kang and Koh, 1999

ND; no data.

로서, 배우체(곱피 25°C, 개다시마와 다시마 20°C)에 비해 아포체가 낮은 온도에서 빠른 성장을 보였다(Table 3). 본 연구에서 미역은 배우체에 비해 아포체 단계에서 성장 적온이 낮음을 확인할 수 있었으며, 생활사 단계별 최적 성장의 환경 요인은 차이가 있다는 것을 파악할 수 있었다.

결론적으로, 쇠미역과 미역은 분류군간 형태의 차이가 있음에도 불구하고 동일한 채묘 및 야외양성 방법을 사용하는 것으로 알려져 있는데, 본 연구에서 2종의 배우체의 성장과 성숙의 최적 환경은 매우 비슷하였으나, 아포체 단계에서는 미역이 쇠미역에 비해 낮은 온도를 성장 적온으로 가지는 차이를 보였다. 2종은 모두 배우체 단계에서 장일(16 h)이나 연속광(24 h)에서 최대 성장을 보였으나 성숙은 오히려 단일(8 h)이나 중일 조건(12 h)에서 최대를 나타냄으로서 일장이 배우체의 성장과 성숙

에 중요한 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 또한, 쇠미역의 배우체는 미역에 비해 빠른 성장과 성숙을 보였으며, 아포체의 성장 적온도 미역에 비해 높은 것으로 확인되어 미역에 비해 빠른 기간 내에 해중립을 조성할 수 있으며 고온에 대한 내성도 상대적으로 좋을 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2015년도 국립수산물과학원 수산과학연구소(R2016030)의 지원에 의해 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 이 논문은 2015년 호남씨그라트센터 연구개발사업 과제지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Akiyama K. 1965. Studies of ecology and culture of *Undaria pinnatifida* (Harv.) Sur. II. Environmental factors affecting the growing and maturation of gametophyte. Bull Tohoku Reg Fish Res Lab 25, 143-170.
- Cho GY 2010. Laminariales. In: Algal Floral of Korea. Volume 2, Number 2. Heterokontophyta: Phaeophyceae; Ishigeales, Dictyotales, Desmarestiales, Sphacelariales, Cutleriales, Ralfisales, Laminariales. Anon., eds. National Institute of Biological Resources, Incheon, Korea, 175-196.
- Choi HG, Kim YS, Lee SJ, Park EJ and Nam KW. 2005. Effects of daylength, irradiance and settlement density on the growth and reproduction of *Undaria pinnatifida* gametophytes. J Appl Phycol 17, 423-430. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-005-0432-2>
- Choi HG, Kim YS, Lee SJ and Nam KW. 2007. Growth and reproductive patterns of *Undaria pinnatifida* sporophytes in a cultivation farm in Busan, Korea. J Appl Phycol 19, 131-138. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-006-9119-6>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-007-9281-5>
- Druehl LD, Collins JD, Lane CE and Saunders GW. 2005. An evaluation of methods used to assess intergeneric hybridization in kelp using pacific Laminariales (Phaeophyceae). J Phycol 41, 250-262. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1529-8817.2005.04143.x>
- Hwang EK, Baek JM and Park CS. 2009. The mass cultivation of *Ecklonia stolonifera* Okamura as a summer feed for the abalone industry in Korea. J Appl Phycol 21, 585-590. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-009-9402-4>
- Hwang EK, Gong YG, Ha DS and Park CS. 2010. Inducing the regeneration and maturation of free-living gametophytes of *Ecklonia stolonifera* Okamura (Laminariales, Phaeophyta). Kor J Fish Aquat Sci 43, 231-238. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2010.43.3.231>
- Kaas R. 1998. The seaweed resources of France. In: Seaweed Resources of the World. Critchley AT and Ohno M, eds. Japan International Cooperation Agency, Yokosuka, Japan, 233-244.
- Kang JW and Koh NP. 1977. Seaweed Culture. Taewha press, Pusan, Korea, 198-236.
- Kang RS and Koh CH. 1999. Germination and growth of *Laminaria japonica* (Phaeophyta) microscopic stages under different temperature and photon irradiances. J Kor Fish Soc 32, 438-443.
- Kim YD, Song HI, Hong JP, Jeon CY, Kim SK, Han HK, Kim DS and Bang JK. 2006. Growth and maturation of the brown seaweed *Costaria costata* transplanted for the wild-stock enhancement. J Life Sci 16, 1044-1051. <http://dx.doi.org/10.5352/JLS.2006.16.6.1044>
- Kim DS, Hong JP, Kim YD, Song HI and Kim HG. 2007a. Seed production and cultivation of *Ecklonia stolonifera* Okamura, Phaeophyta. J Aquacult 20, 7-13.
- Kim JH, Kim YD, Song HI, Gong YG, Lee SB and Jin HJ. 2007b. Separation and preservation of the male and female gametophytes of *Kjellmaniella crassifolia* Miyabe (Phaeophyta). J Kor Fish Soc 40, 387-393. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2007.40.6.387>
- Kim HG, Park JG and Kim DS. 2005. Comparative laboratory culture studies of the native kelp *Kjellmaniella crassifolia* and the introduced kelp *Laminaria japonica* in east coast of Korea. J Aquacult 18, 299-304.
- Kim YS and Nam KW. 1997. Temperature and light responses on the growth and maturation of gametophytes of *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar in Korea. J Kor Fish Soc 30, 5050510.
- Li DP, Zhou ZG, Liu HH and Wu CY. 1999. A new method of *Laminaria japonica* strain selection and seedling culture by the use of gametophyte clones. Hydrobiologia 398/399, 473-476. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-4449-0_57
- Liu J, Dong L, Shen Y and Wu C. 2004. Effect of light period on egg-discharge of gametophyte clones of *Undaria pinnatifida* (Phaeophyta). J Appl Phycol 16, 519-521.
- Lüning K. 1981. Egg release in gametophytes of *Laminaria saccharina*: Induction by darkness and inhibition by blue light and UV. Br Phycol J 16, 379-393. <http://dx.doi.org/10.1080/00071618100650441>
- Morita T, Kurashima A and Maegawa M. 2003. Temperature requirements for the growth and maturation of the gametophyte of *Undaria pinnatifida* and *U. undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). Phycol Res 51, 154-160. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1440-1835.2003.t01-1-00305.x>
- Morelissen B, Dudley BD, Geange SW and Phillips NE. 2013. Gametophyte reproduction and development of *Undaria pinnatifida* under varied nutrient and irradiance conditions. J Exp Mar Biol Ecol 448, 197-206.
- Oh JC, Yoo OH and Choi HG. 2015. Interactive effects of increased temperature and pCO₂ concentration on the growth of a brown algae *Ecklonia cava* in the sporophyte and gametophyte stages. Ocean Polar Res 37, 201-209.
- Pang SJ, Hu XY, Wu CY, Hirosawa A and Ohno M. 1997. Intraspecific crossings of *Undaria pinnatifida* (Harv.) Sur. A possible time-saving way of strain selection. Chin J Oceanol Limnol 15, 227-235. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02850878>
- Park SK, Heo JS, Kim BY, Song JN, Lim GY, Kim HN and Choi HG. 2011. Comparison on the growth of *Costaria costata* and *Undaria pinnatifida* sporophytes in culture and their field populations. Kor J Fish Aquat Sci 44, 71-77. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2011.44.1.071>
- Saito Y. 1956. An ecological study of *Undaria pinnatifida* Sur.

- II. On the influence of environmental factors upon the maturity of gametophytes and early development of sporophytes. Bull Jpn Soc Sci Fish 22, 235-239. <http://dx.doi.org/10.2331/suisan.22.229>
- Saito Y. 1975. Practical significance of algae in Japan. In: Advance phycology in Japan. Tokida J and Hirose H. eds. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, Netherlands, 304-320.
- Serisawa Y, Yokohama Y, Aruga Y and Tanaka J. 2002. Growth of *Ecklonia cava* (Laminariales, Phaeophyta) sporophytes transplanted to a locality with different temperature conditions. Phycol Res 50, 201-207. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1440-1835.2002.00274.x>
- Shea R and Chopin T. 2007. Effects of germanium dioxide, and inhibitor of diatom growth, on the microscopic laboratory cultivation stage of kelp, *Laminaria saccharina*. J Appl Phycol 19, 27-32. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-006-9107-x>
- Sohn CH. 2004. Developments on two newly cultivated species *Capsosiphon fulvescens* and *Costaria costata* in Korea. J Phycol Suppl 39, 53-54. http://dx.doi.org/10.1111/j.0022-3646.2003.03906001_154.x
- Sokal RR and Rohlf FJ. 1995. Biometry, 3rd edn. WH Freeman. New York. USA.
- Tseng CK, Ren KZ and Wu CY. 1959. On the discharge of eggs and spermatozoids of *Laminaria japonica* and the morphology of the spermatozoids. Kexue Tongbao 4, 129-130.
- Tatewaki M. 1966. Formation a crustaceous sporophyte with unilocular sporangia in *Scytosiphon lomentaria*. Phycologia 6, 62-66. <http://dx.doi.org/10.2216/i0031-8884-6-1-62.1>
- Westermeier R, Patiño D, Piel MI, Maier I and Mueller DG. 2006. A new approach to kelp mariculture in Chile: production of free-floating sporophyte seedlings from gametophyte cultures of *Lessonia trabeculata* and *Macrocystis pyrifera*. Aqua Res 37, 164-171. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01414.x>
- Wi MY, Hwang EK, Kim SC, Hwang MS, Baek JM and Park CS. 2008. Regeneration and maturation induction for the free-living gametophytes of *Ecklonia cava* Kjellman (Laminariales, Phaeophyta). J Kor Fish Soc 41, 381-388. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2008.41.5.381>
- Wu CY, Pang SJ and Jiang BY. 1994. Establishment and application of vegetative gametophytes of *Laminaria japonica*. In: Seaweed Biotechnology. Wang SJ, ed. Shanghai Scientific and Technical Publishers, Shanghai, China, 104-110.
- Wu CY, Li DP, Liu HH, Peng GA and Liu JX. 2004. Mass culture of *Undaria* gametophyte clones and their use in sporeling culture. Hydrobiologia 512, 153-156.
- Xu B, Zhang QS, Qu SC, Cong YZ and Tang XX. 2009. Introduction of a seedling production method using vegetative gametophytes to the commercial farming of *Laminaria* in China. J Appl Phycol 21, 171-178. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-008-9347-z>