

# 대형 갈조류 감태(*Ecklonia cava* Kjellman) 배우체 단편의 생장에 미치는 온도와 조도의 영향

강진우 · 정익교<sup>1\*</sup>

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1</sup>부산대학교 해양학과

## Effects of Temperature and Light Intensity on the Gametophyte Fragment Growth of *Ecklonia cava* Kjellman (Laminariales, Phaeophyta)

Jin Woo Kang and Ik Kyo Chung<sup>1\*</sup>

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Korea

<sup>1</sup>Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 46241, Korea

We examined the effects of temperature and light intensity on gametophyte growth of *Ecklonia cava* Kjellman. The growth of female and male gametophytes was investigated before maturation. Gametophytes prepared from Munseom, Jeju, Korea in October 2014 were separated by sex and maintained under the following conditions: 15°C, 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , and a 12-h/12-h light/dark cycle. The experiments were conducted at five temperatures (10, 15, 20, 25, and 30°C) and three light intensities (5, 20, and 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Daily growth rates were estimated by the increase in filamentous frond area. The optimal growth conditions for female gametophytes were 20°C and 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; the optimal conditions for male gametophytes were 15°C and 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . The relative growth rates (RGR) of female and male gametophytes decreased at 25°C and 30°C, respectively. At 30°C, RGRs of gametophytes decreased by approximately 1.0% day<sup>-1</sup>. In addition, RGRs of male gametophytes were higher than those of female gametophytes. These results indicate that female gametophytes were more sensitive to temperature and light intensity than male gametophytes. Moreover, these results suggest that *E. cava* growth rates could decrease as a result of global warming.

Key words: *Ecklonia cava*, Gametophytes, Growth, Temperature, Light intensity

### 서론

대형 갈조류 감태(*Ecklonia cava*)는 다시마목 감태과의 다년 생 해조로 우리나라 남해안, 제주도, 일본 그리고 독도 인근 해역의 수심 2-30 m의 조하대 지역에 분포하고 있다. 감태 엽체는 평균 1-2 m까지 자라고, 최대 3 m까지 자라는 개체도 있다 (Hayashida, 1977; Iwahashi et al., 1979; Choi et al., 2009). 감태는 해중림을 구성하여 연안 생태계의 일차 생산자 및 서식처 제공자로서의 중요한 역할을 담당하고 있다 (Yokohama et al., 1987; Kang and Yoo, 1993).

감태는 중요한 해양 생물자원으로, 추출된 기능성 물질들은 항고혈압, 항산화, 항균효과 등 다양한 효과가 있는 것으로 보고되고 있으며 (Athukorala et al., 2006; Hong et al., 2006; Kim

et al., 2015), 수온이 높아지는 여름철 다시마를 대신해 곱피와 함께 전복의 먹이원으로 이용하고 있다 (Hwang et al., 2013b). 또한 감태는 해조류를 이용한 온실가스 저감사업의 대상으로 곱피와 함께 온실가스 저감원으로서의 역할도 연구된 바 있으며, 바다숲 조성사업에도 이용되고 있다 (Chung et al., 2013; Kim et al., 2013). 이처럼 감태의 이용 및 가치는 꾸준히 증가하는 반면 자연개체군은 감소되고 있어 해양수산부에서는 수산자원보호령 제 9조를 통해 5월에서 7월까지 감태의 채집 금지기간을 설정하여 개체군을 보호하고 있다 (Wi et al., 2008).

대형 갈조류 감태는 전형적인 이형세대교번을 하는 해조류로 육안으로 확인 가능한 포자체 세대와 현미경으로 관찰 가능한 배우체 세대로 나뉘며 포자체는 형태학적으로 크게 부착기, 줄기부, 엽상부의 세 부분으로 나누어 진다. 감태는 주로 2-6월

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0704>



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 48(5) 704-711, October 2015

Received 15 July 2015; Revised 20 August 2015; Accepted 22 September 2015

\*Corresponding author: Tel: +82. 51. 510. 2279 Fax: +82. 51. 581. 2963

E-mail address: ikchung@pusan.ac.kr

에 자라고, 6월에 최대 생물량을 보이며, 1-5년생이 혼재하여 군집을 이룬다. 감태의 성숙한 엽체로부터 방출된 포자는 발아하여 주로 수온이 낮은 가을에서 겨울철 암 배우체, 수 배우체로 성장하여 성숙한다. 자낭반을 가진 엽체는 10월경에 출현 비율이 가장 높게 나타나 유주자를 채모하기에 적합한 시기이다 (NFRDI, 2009).

해조류의 생활사 중 배우체 단계는 개체군을 유지하고 새로운 세대를 형성하는 단계이며 환경요인의 영향을 받는다. 이와 같은 이유로 배우체의 생리활성 연구도 지속적으로 수행되고 있다(Kain, 1979; Altamirano et al., 2004). 그러나 감태를 대상으로 한 연구들은 대개 포자체를 위주로 이루어졌으며(Yokohama et al., 1987; Serisawa et al., 2001), 배우체를 대상으로 한 연구는 많지 않다(Altamirano et al., 2003, 2004).

현재까지 해조류 배우체 단계에서의 생장 및 성숙 조건을 규명하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다(Bolton and Levitt, 1985; Morita et al., 2003; Wi et al., 2008; Hwang et al., 2010a, 2011; Komazawa et al., 2014). 우리나라의 경우, 주로 대량 양식을 목적으로 배양조건에 따른 감태 배우체의 최대 생장 및 성숙에 관한 연구가 보고되었으나, 배우체 발달 단계별 생리학적 연구는 미비하다(Wi et al., 2008; Hwang et al., 2010b, 2013a). 따라서 감태 배우체의 생리활성 연구를 위해 온도와 조도에 따른 암 배우체, 수 배우체의 생장률 변동과 암 배우체, 수 배우체 사이의 생장률 차이가 발생하는 원인에 관한 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

본 연구는 배우체의 생장과 성숙 원리가 다른 점을 고려하여 성숙 전 감태 배우체 초기 생장의 생리·생태적 특성을 파악하기 위해 온도와 조도조건의 변화가 성숙 전 배우체의 생장률에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 기후변화로 인한 지구온난화의 가속화로 수온상승이 지속될 경우, 고온에서의 배우체의 생장률 변동을 통해 자연상태의 감태 개체군에 미칠 잠재적인 영향을 파악해 보고자 하였다.

## 재료 및 방법

본 연구에 사용된 감태 성숙 모조는 2014년 10월, 제주도 문섬(33°13' N, 126°34' E)에서 SCUBA diving을 통해 채집하였다. 제주도 문섬은 천연보호지역으로 해조류의 분포가 다양하며, 연중 감태가 우점하고 있다(Ko et al., 2008). 채집된 감태의 성숙 모조를 실험실로 운반하여 부착생물을 제거하고 여과해수(0.45 μm)에 수 차례 세척하였다.

실험실로 운반하여 수 차례 세척한 성숙 모조의 자낭반 부분을 절취하여 2시간 정도 건조시켰다. 여과해수 500 mL를 채운 1 L의 bottle에 건조된 자낭반 조각을 넣고, 포자방출을 유도하였다. 포자방출은 15°C, 20 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>의 조건에서 유도되었다. 방출된 유주자액은 24, 96 다중 홈 플레이트를 이용하여 희석시켜 한 홈당 1.2 mL씩 분주하였다. 그 후 50-60일간 포자가 발아하여 배우체가 충분한 크기에 도달할 때까지 배양하였다. 배우체의 배양 용기는 파장대가 600-670 nm인 붉은색 젤라틴 필터지가 쌓인 용기에 담아 성숙을 억제하였다(Lüning and Dring, 1972).

암 배우체와 수 배우체의 구별이 가능한 크기인 직경 3 mm에 도달한 배우체 덩어리를 도립현미경(Olympus CK40-F200) 아래에서 암 배우체와 수 배우체로 구별하였다. 암 배우체와 수 배우체를 각각 PES 배양해수(Provasoli, 1968) 250 mL와 함께 blender를 이용하여 1,000 μm<sup>2</sup> 이하, 세포수 10개 정도의 조각으로 나누었다. 그 후 적정 밀도(5 개체/홈)로 희석하였고 배양해수 250 mL와 함께 GeO<sub>2</sub> 5 mgL<sup>-1</sup>를 첨가하여 규조류의 번성을 억제하였다(Shea and Chopin, 2007). 각각 암, 수 배우체 단편이 포함된 배양액은 24 다중 홈 플레이트를 이용하여 한 홈당 600 μL씩 분주하였다. 배양액은 3일 간격으로 전량 교체하였다. 온도구배판(Temperature gradient table)과 LED (Light Emitting Diode)를 이용하여 7일간 배양을 실시하였고, 배양 조건은 5개의 온도구간(10, 15, 20, 25, 30°C) 그리고 3개의 조도구간(5, 20, 40 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)으로 설정하였다. 조도는 LI-250 (LI-COR, USA)으로 측정하였다. 성숙 전 배우체 초기 단계의 생장은 도립현미경 하에서 사진을 촬영하여 Image J 프로그램으로 면적 측정을 통해 분석하였다. 배우체의 상대생장률은 아래의 식으로 계산하였고(Morita et al., 2003), 실험구 별로 암 배우체, 수 배우체 각각 12개체의 면적을 측정하였다.

Table 1. Results of two-way ANOVA for the effects of light intensity (L) and temperature (T) on relative growth rates of female and male gametophytes of *Ecklonia cava*

Variables	Source	df	MS	F-ratio	P-value
Female	Light intensity (L)	2	38.42	57.73	<0.05
	Temperature (T)	4	229.48	344.77	<0.05
	L × T	8	27.63	41.51	<0.05
	Error	165	0.67		
Male	Light intensity (L)	2	39.77	56.89	<0.05
	Temperature (T)	4	236.03	337.61	<0.05
	L × T	8	15.69	22.44	<0.05
	Error	165	0.70		

$$\text{Relative growth rate} = (\ln A_2 - \ln A_1) \times 100 / (T_2 - T_1)$$

A<sub>1</sub>: 초기 배우체 면적, A<sub>2</sub>: 최종 배우체 면적, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>: 배양 기간(일)

암 배우체, 수 배우체의 생장과 관련된 일련의 자료는 Levene의 등분산검정을 실시하였다. 온도와 조도 조건에 대해 분산분석으로 유의성 분석을 실시하였으며, 자료에 관한 유의성이 확인되면 사후검정을 실시하였다. 모든 분석은 SPSS (version.

21.0) 통계프로그램을 이용하여 수행하였다.

## 결 과

암 배우체와 수 배우체의 생장은 온도와 조도조건에 따라 차이를 보였다. 또한 온도와 조도조건의 상호작용이 확인되었다 (Table 1).

배양 7일 후, 조도조건  $5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  하에서 암 배우체의 상대생장률은 10, 15, 20°C까지 증가하는 경향을 보였다(Fig. 1A). 암 배우체는 20°C 온도조건에서  $5.28 \pm 0.49\% \text{ day}^{-1}$ 로 최대의 생장을 보였다(Table 2). 그러나 25°C의 이상의 온도조건에서는 상대생장률이 현저하게 감소하였으며 30°C의 온도조건에서 가장 낮은 생장률을 보였다. 온도조건 30°C에서 암 배우체의 상대생장률은  $1.30 \pm 0.86\% \text{ day}^{-1}$ 였다.

수 배우체는 암 배우체와 동일하게 10, 15, 20°C까지 상대생장률이 증가하였고, 20°C에서 최대 생장률을 보였다(Fig. 1D). 온도조건 20°C에서 생장률은  $6.36 \pm 0.19\% \text{ day}^{-1}$ 였다(Table 3). 온도조건 25°C 이상에서 상대생장률 감소가 확인되었고 30°C에서 최저 생장률을 보였으며 그 값은  $1.41 \pm 0.84\% \text{ day}^{-1}$ 였다. 조도조건  $5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  아래의 전 온도구간에서 수 배우체의 상대생장률이 암 배우체보다 높게 나타났다.

조도조건  $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 하, 온도조건 10, 15, 20°C에서 암 배우체의 경우 상대생장률이 증가하는 경향성을 보였으며 25°C의 온도조건에서 약간 감소하였으나  $5.99 \pm 0.70\% \text{ day}^{-1}$ 의 값으로 비교적 높게 유지되었다(Fig. 1B). 암 배우체의 최대 생장은 20°C에서  $7.39 \pm 0.30\% \text{ day}^{-1}$ 였다(Table 2). 온도조건 30°C의 고온에서는 상대생장률이 급격하게 감소하였고  $1.04 \pm 0.66\% \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다.

수 배우체의 경우 10, 15°C의 온도조건에서 상대생장률이 증가하는 경향성을 보였으며 20°C 이상의 온도구간에서는 감소

하는 경향을 보였다(Fig. 1E). 그러나 온도조건 20°C에서 수 배우체의 상대생장률은 암 배우체보다 높게 나타났다. 수 배우체의 최대 생장은 15°C에서  $9.62 \pm 1.38\% \text{ day}^{-1}$ 였다(Table 3). 온도조건 30°C의 고온에서는 암 배우체와 마찬가지로 상대생장률이 급격하게 감소하였고 그 값은  $1.17 \pm 0.71\% \text{ day}^{-1}$ 였다. 온도조건 25°C를 제외하고 10, 15, 20, 30°C에서 수 배우체의 상대생장률이 암 배우체보다 높게 나타났다.

조도조건  $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 하, 온도조건 10, 15, 20°C에서 암 배우체의 상대생장률은 증가하는 경향성을 보였다(Fig. 1C). 암 배우체의 최대 생장은 20°C에서 나타났고 그 값은  $10.53 \pm 2.51\% \text{ day}^{-1}$ 였다(Table 2). 온도조건 25°C 이상에서는 상대생장률이 급격하게 감소하였다. 그러나 온도조건 25°C에서는 10°C보다 높은 상대생장률을 보였으며, 30°C에서  $1.18 \pm 0.27\% \text{ day}^{-1}$ 로 최저 상대생장률을 보였다.

수 배우체의 경우 10°C와 15°C의 온도조건에서 상대생장률이 증가하였다(Fig. 1F). 수 배우체의 최대 생장은 15°C에서 확인되었고  $7.07 \pm 0.70\% \text{ day}^{-1}$ 였다(Table 3). 온도조건 20°C 이상에서 감소하는 경향성을 보였으나 10°C에 비해 20°C와 25°C에서 상대생장률이 높게 나타났다. 암 배우체와 동일하게 30°C의 온도조건에서 최저 생장률을 보였으며 그 값은  $1.36 \pm 0.11\% \text{ day}^{-1}$ 였다. 온도조건 20°C를 제외하고 10, 15, 25, 30°C에서 수 배우체의 상대생장률이 암 배우체에 비해 높게 나타났다.

배양 7일 후, 온도조건 10°C 아래 암 배우체의 상대생장률은  $5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 조도조건에서  $3.24 \pm 0.40\% \text{ day}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났다(Fig. 2A). 조도조건 20,  $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 수 배우체의 상대생장률은 암 배우체와 마찬가지로  $5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 조건에서  $3.58 \pm 0.41\% \text{ day}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났다(Fig. 2B). 조도조건 20,  $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 암 배우체와 동일하게 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 조도조건 5,  $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 수 배우체의 상대생장률

Table 2. Relative growth rates (% day<sup>-1</sup>) of fragment female gametophytes in *Ecklonia cava* according to different temperature

Light intensity ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Temperature (°C)				
	10	15	20	25	30
5	$3.24 \pm 0.40^a$	$4.02 \pm 0.45^b$	$5.28 \pm 0.49^c$	$2.46 \pm 0.69^a$	$1.30 \pm 0.86^d$
20	$2.16 \pm 0.67^a$	$6.71 \pm 0.34^{b,c}$	$7.39 \pm 0.30^b$	$5.99 \pm 0.70^c$	$1.04 \pm 0.66^d$
40	$2.58 \pm 0.23^{a,d}$	$5.45 \pm 0.30^b$	$10.53 \pm 2.51^c$	$3.44 \pm 0.27^a$	$1.18 \pm 0.27^d$

Values are means $\pm$ SD (n=12 replicates) in each row with the different superscript are significantly different ( $P < 0.05$ ).

Table 3. Relative growth rates (% day<sup>-1</sup>) of fragment male gametophytes in *Ecklonia cava* according to different temperature

Light intensity ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Temperature (°C)				
	10	15	20	25	30
5	$3.58 \pm 0.41^a$	$5.32 \pm 0.52^b$	$6.36 \pm 0.19^c$	$2.56 \pm 0.71^d$	$1.41 \pm 0.84^e$
20	$2.71 \pm 0.40^a$	$9.62 \pm 1.38^b$	$7.58 \pm 1.94^c$	$5.97 \pm 0.87^d$	$1.17 \pm 0.71^a$
40	$2.21 \pm 0.84^a$	$7.07 \pm 0.70^b$	$6.37 \pm 0.56^b$	$4.10 \pm 0.46^c$	$1.36 \pm 0.11^d$

Values are means $\pm$ SD (n=12 replicates) in each row with the different superscript are significantly different ( $P < 0.05$ ).

이 암 배우체에 비해 높게 나타난 반면, 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 암 배우체의 상대성장률이 높게 나타났다.

온도조건 15°C 아래 암 배우체의 상대성장률은 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 조건에서  $6.71\pm 0.34\%$  day<sup>-1</sup>로 가장 높게 나타났으며 (Fig. 2A), 수 배우체의 상대성장률은 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서  $9.62\pm 1.38\%$  day<sup>-1</sup>로 수 배우체의 전체 배양조건 중 가장 높게 나타났다(Fig. 2B). 전 조도구간에 있어서 수 배우체의 상대생

장률이 암 배우체에 비해 높게 나타났다.

온도조건 20°C 아래 암 배우체의 상대성장률은 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서  $10.53\pm 2.51\%$  day<sup>-1</sup>로 암 배우체의 전체 배양조건 중 가장 높게 나타났다(Fig. 2A). 수 배우체의 상대성장률은 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서  $7.58\pm 1.94\%$  day<sup>-1</sup>로 가장 높게 나타났으나(Fig. 2B), 5와 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 각각  $6.36\pm 0.19$ ,  $6.37\pm 0.56\%$  day<sup>-1</sup>로 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 조도

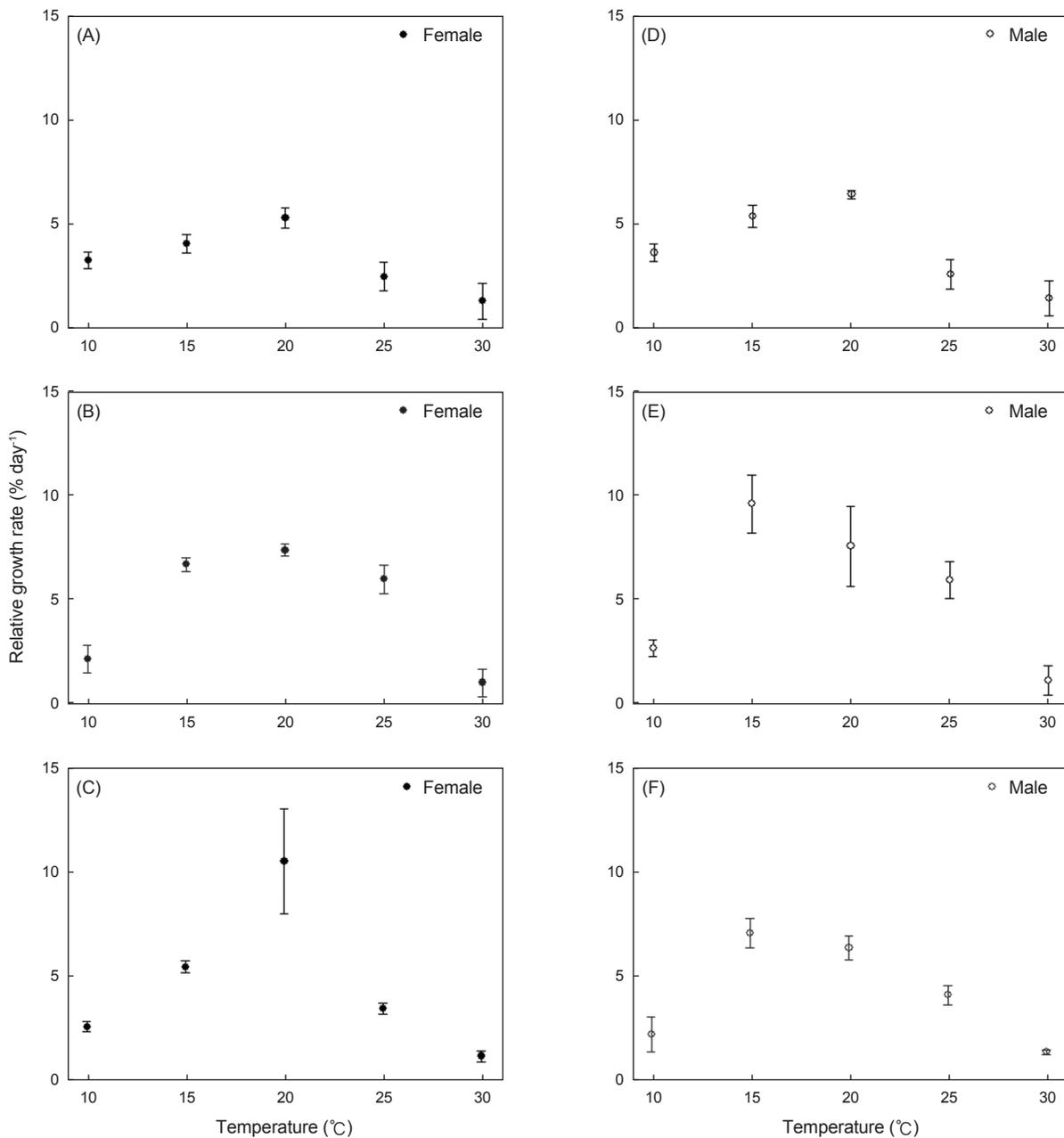


Fig. 1. Relative growth rates of female and male gametophytes fragment of *Ecklonia cava* under different temperature. Culture conditions were 5  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (A, D), 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (B,E) and 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (C,F). Vertical bars indicate SD (n = 12 replicates).

조건 5와 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 수 배우체의 상대생장률이 암 배우체에 비해 높게 나타났고, 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 암 배우체의 상대생장률이 높게 나타났다.

온도조건 25°C 아래 암 배우체의 상대생장률은 조도조건 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서  $5.99 \pm 0.70\% \text{ day}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났다(Fig. 2A). 수 배우체의 상대생장률은 암 배우체와 동일하게 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 최대로 나타났고 그 값은  $5.97 \pm 0.87\% \text{ day}^{-1}$ 였다(Fig. 2B). 조도조건 5, 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 수 배우체의 상대생장률이 암 배우체에 비해 높게 나타났고, 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 암 배우체의 상대생장률이 높게 나타났다.

온도조건 30°C 아래 암 배우체의 상대생장률은 조도조건 5, 20, 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 각각  $1.30 \pm 0.86$ ,  $1.04 \pm 0.66$ ,  $1.18 \pm 0.27\% \text{ day}^{-1}$ 로 나타났으나 통계적으로 유의한 차이가 없었다(Fig. 2A). 수 배우체의 상대생장률은 조도조건 5, 20, 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 각각  $1.41 \pm 0.84$ ,  $1.17 \pm 0.71$ ,  $1.36 \pm 0.11\% \text{ day}^{-1}$ 로 나타났으며 암 배우체와 마찬가지로 통계적으로 유의한 차이가 없었다(Fig. 2B). 조도조건 5, 20, 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 수 배우체의 상대생장률이 암 배우체에 비해 높게 나타났다.

## 고 찰

대형 갈조류 감태의 배우체 단편은 배양 조건에 따라 생장률에서 차이를 보였다. 일반적으로 배우체 단편의 생장은 원 배우체의 크기와 단편의 크기에 따라 달라질 수 있다(Wi et al., 2008). 본 연구에서는 동시에 발아하여 직경 3 mm에 도달한 암 배우체와 수 배우체를 대상으로 단편 조직이 훼손되지 않는 크기를 고려해 약 10개의 세포로 된 분지하지 않은 사상체를 이용하였으며, 면적 1,000  $\mu\text{m}^2$  정도의 초기 배우체 생장으로 한정하였다. 조도조건 5  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 암 배우체와 수 배우체 모두 20°C에서 최대의 생장을 보였다. 조도조건 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

에서 암 배우체의 경우 20°C에서 최대의 생장을 보였으며 수 배우체의 경우 15°C에서 최대의 생장을 보였다. 조도조건 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 암 배우체와 수 배우체는 각각 20°C, 15°C에서 최대의 생장을 나타냈다. 온도조건 10, 30°C 일 때, 암 배우체와 수 배우체는 조도조건 5  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 최대의 생장을 보였다. 온도조건 15°C와 25°C에서는 암 배우체와 수 배우체 모두 조도조건 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 최대의 생장을 보였다. 온도조건 20°C에서는 암 배우체의 경우 조도조건 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 수 배우체의 경우 조도조건 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 최대의 생장을 보였다. 연구결과를 종합하면 암 배우체의 최대 생장률은 20°C, 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서  $10.53 \pm 2.51\% \text{ day}^{-1}$ 였고, 수 배우체는 15°C, 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서  $9.62 \pm 1.38\% \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다. 또한 온도와 조도조건을 온도 5 x 조도 3의 요인설계로 조합하여 실험한 결과를 분석하였다. 각 요인별 분석 시 통계적으로 유의한 결과를 확인하였다( $P < 0.05$ ). 온도조건 10-20°C, 조도조건 5-40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 온도와 조도가 모두 높아짐에 따라 상대생장률이 증가하는 경향성을 보였다. 그러나 25°C 이상의 고온에서는 뚜렷한 경향성이 나타나지 않았다. 따라서, 온도와 조도조건의 상호작용에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

Wi et al. (2008)은 감태 암 배우체와 수 배우체의 최대 생장이 15°C, 20  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  조건에서 나타남을 확인하였다. 위의 결과는 본 연구결과와는 약간의 차이를 보였다. 본 연구에서는 감태 배우체의 길이 대신 면적 측정을 이용하여 상대생장률을 도출했으며 이는 3차원적으로 성장하여 분지하는 배우체의 형태적 특성을 고려한 것이다. Wi et al. (2008)와 본 연구는 분석 방법이 상이하여 결과의 차이가 발생한 것으로 생각된다. 그러나, 감태 배우체의 경우 10-27°C의 온도 조건에서 생장이 가능하며(Ohta, 1988; Tanaka et al., 2008), 감태속의 종들을 대상으로 실험을 진행해본 결과 *E. maxima*는 15-20°C, *E. stolonifera*는 15°C, *E. radiata*는 20-22°C의 조건에서 최대의 생장이 이루

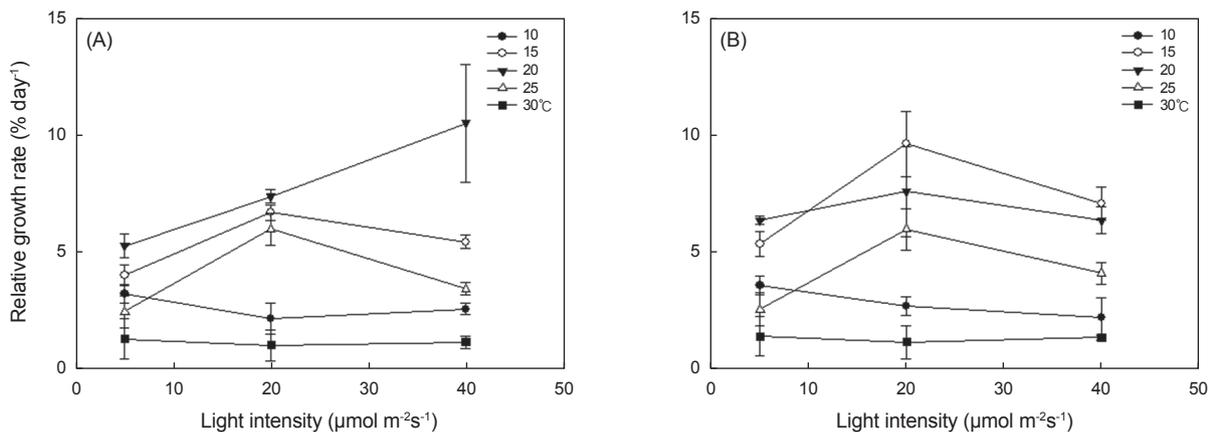


Fig. 2. Relative growth rates of female (A) and male (B) gametophytes fragment of *Ecklonia cava* under different light intensity. Vertical bars indicate SD (n=12 replicates).

어집이 확인된 바 있다(Bolton and Levitt, 1985; Hwang et al., 2010a; Mohring et al., 2014). 본 연구 결과, 감태는 위에 언급된 종들과 유사한 15-20℃의 온도조건에서 최대의 생장이 이루어졌다.

일부 배양 조건을 제외하고 수 배우체는 암 배우체보다 높은 상대생장률을 보였다. 이는 *Laminaria saccharina* (Lee and Brinkhus, 1988), *Undaria pinnatifida*, *U. undarioides* (Morita et al., 2003), *E. stolonifera* (Hwang et al., 2010a), *Eckloniopsis radicata* (Komazawa et al., 2014) 등 갈조류를 대상으로 한 연구결과에서도 확인되었다. Destombe and Oppliger (2011)는 *L. digitata*를 대상으로 실험을 진행한 결과 암 배우체의 경우 적절한 성장 환경에서 성숙을 위해 성장을 멈추지만, 수 배우체는 성숙을 진행함과 동시에 성장을 진행한다고 하였다. 또한 암 배우체는 수 배우체에 비해 개체의 크기는 크지만 성장률은 낮은데 이는 좋지 않은 환경 아래에서 수 배우체가 암 배우체보다 잘 자랄 수 있기 때문으로 분석 하였다. 본 연구에서도 이와 같이 다양한 요인에 의해 상대생장률 도출 시, 수 배우체의 상대생장률이 암 배우체보다 더 높게 나타나는 것으로 생각된다. Komazawa et al. (2014)은 암 배우체와 수 배우체의 성장률 차이는 아마도 고온에서 생육하는 대형 갈조류의 특이한 현상일 수 있다고 하였다. 반면, 기존의 Wi et al. (2008) 연구 결과는 암 배우체의 상대생장률이 수 배우체 보다 높게 나타났다. 이는 감태 개체군의 시료 채취 장소 및 실내 실험 환경의 차이에서 기인한 것으로 생각된다. 또한 배양을 위한 실내 실험 조건과 자연에서의 생육 조건 차이도 중요한 요인으로 작용했을 것으로 보인다. 자연 조건에서 해조류의 성장에는 해수의 유동 등 물리적 요인 뿐만 아니라 화학적 요인이 복합적으로 작용하나(Hurd, 2000; Peteiro and Freire, 2011) 실내 실험의 경우, 해수의 유동이 없이 정적인 상태가 유지되기 때문에 각 실험마다 결과의 차이가 있을 것으로 생각한다.

온도조건 20℃에서, 암 배우체와 달리 수 배우체의 경우 조도 조건 5  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 을 제외한 20, 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  조건에서 생장의 감소가 나타났으나, 현재의 실험조건에서는 정확한 설명이 어렵다고 생각된다. 위와 같은 결과는 감태속을 대상으로 한 Wi et al. (2008)과 Hwang et al. (2010a)의 연구결과와 유사하였다. 온도조건 25℃ 이상의 고온에서 암 배우체와 수 배우체의 생장은 뚜렷하게 감소하는 경향성을 보였다. 특히 30℃ 이상의 고온에서는 모든 온도와 조도조건에서 1%  $\text{day}^{-1}$  정도의 최저 성장률이 나타났으며, 암 배우체가 수 배우체에 비해 온도변화에 민감하게 반응했다. 본 연구결과와 동일하게 높은 온도에서 대형 갈조류들의 성장률은 급격하게 감소하며 성장 뿐만 아니라 암 배우체의 성숙도가 급격하게 떨어진다는 연구결과가 보고된 바 있다(Morita et al., 2003; Zhang et al., 2013; Komazawa et al., 2014). 이처럼 지구온난화의 가속화로 인해 해수의 수온은 꾸준히 증가하고 있으며, 감태 배우체의 성장 및 성숙에 미칠 영향 또한 클 것으로 예상된다. 감태 배우체의 성장과 성숙도가

감소하면 배우체의 생육과 포자체 형성에 영향을 미치게 될 것이며, 이는 가입의 감소를 초래하여 결과적으로 개체군의 현존량 유지가 어려울 것으로 보인다.

조사정점인 제주도 해역의 월별 평균 수온(KHOA, 2009-2014)은 8월 24.3℃로 최고를 보였고 2월 14.3℃로 최저를 보였다. 성숙한 감태로부터 방출된 포자가 발아한 배우체는 가을에서 겨울철(10월~2월)까지, 13.3-19.6℃의 수온에서 자라게 된다. 본 연구결과에서 감태의 암 배우체와 수 배우체는 15-20℃에서 최대의 성장을 보였다. 본 연구에서 조사한 감태 배우체 생장은 서식지의 수온 및 조도 조건에 적응해 있는 것으로 생각된다. 일반적으로 배우체의 생장은 서식지의 수온 및 조도 조건에 순응하며, 대형 갈조류의 경우 해당 수역의 수온 및 조도 조건에 적응하고 있다(Fain and Murray, 1982; Rothäusler et al., 2011). 특히 수온은 감태를 비롯한 해조류의 지리학적 분포에도 큰 영향을 주는 요인 중 하나로 보고된 바 있다(Druehl, 1981; Morita et al., 2003; Komazawa et al., 2014).

본 연구는 대형 갈조류 감태를 대상으로 온도와 조도에 따른 배우체의 성장 변동을 확인하고자 하였으며, 암 배우체와 수 배우체의 성장률 차이를 확인하였다. 또한 지구온난화의 가속화로 인한 지속적인 수온상승의 영향으로 감태 배우체의 생장은 잠재적으로 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

지구온난화와 수온상승에 따른 감태 배우체의 생리학적 영향을 파악하는 것은 기후변화에 대한 적응방안을 마련하는 하나의 방법일 수 있다. 향후, 기후변화에 따른 해양학적 요소들의 변화가 감태 생활사의 기초 단계인 배우체의 성장에 미치는 영향을 파악하고, 암 배우체와 수 배우체의 성장률 차이가 발생하는 원인에 관한 생리·생태적 연구가 더 필요할 것으로 보인다. 또한 감태 생활사의 전반적인 관찰을 통하여 개체군을 일정 수준 이상으로 유지하는 방안을 마련하는 것도 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 일반연구지원사업(커리어)의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2013R1A1A2009359-기후변화에 대응한 CDM 사업 관련 해조류 생리 생태 연구).

## References

- Altamirano M, Murakami A and Kawai H. 2003. Photosynthetic performance and pigment content of different developmental stages of *Ecklonia cava* (Laminariales, Phaeophyceae). Bot Mar 46, 9-16. <http://dx.doi.org/10.1515/BOT.2003.003>.
- Altamirano M, Murakami A and Kawai H. 2004. High light stress in the kelp *Ecklonia cava*. Aqua Bot 79, 125-135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquabot.2004.01.011>.
- Athukorala Y, Kim KN and Jeon YJ. 2006. Antiproliferative

- and antioxidant properties of an enzymatic hydrolysate from brown alga, *Ecklonia cava*. Food Chem Toxicol 44, 1065-1074. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2006.01.011>.
- Bolton JJ and Levitt GJ. 1985. Light and temperature requirements for growth and reproduction in gametophytes of *Ecklonia maxima* (Alariaceae: Laminariales). Mar Bio 87, 131-135. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00539420>.
- Choi CG, Lee HW and Hong BK. 2009. Marine algal flora and community structure in Dokdo, East sea, Korea. J Kor Fish Soc 42, 503-508. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2009.42.5.503>.
- Chung IK, Oak JH, Lee JA, Shin JA, Kim JG and Park KS. 2013. Installing kelp forests/seaweed beds for mitigation and adaptation against global warming: Korean Project Overview. ICES J Mar Sci 70, 1038-1044. <http://dx.doi.org/10.1093/icesjms/fss206>.
- Destombe C and Oppliger LV. 2011. Male gametophyte fragmentation in *Laminaria digitata*: a life history strategy to enhance reproductive success. Cah Biol Mar 52, 385-393.
- Druehl LD. 1981. Geographic distribution. In: The biology of seaweeds. Lobban CS and Wynne MJ, eds. Blackwell Scientific Publications, Boston, U.S.A., 306-325.
- Fain SR and Murray SN. 1982. Effects of light and temperature on net photosynthesis and dark respiration of gametophytes and embryonic sporophytes of *Macrocystis pyrifera*. J Phycol 18, 92-98. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1529-8817.1982.tb03161.x>.
- Hayashida F. 1977. On age and growth of brown alga, *Ecklonia cava* Kjellman, forming aquatic forest. Bull Jap Soc Sci Fish 43, 1043-1051.
- Hong JH, Son BS, Kim BK, Chee HY, Song KS, Lee BH, Shin HC and Lee KB. 2006. Antihypertensive effect of *Ecklonia cava* extract. Korean J Pharmacol 37, 200-206.
- Hurd CL. 2000. Water motion, marine macroalgal physiology and production. J Phycol 36, 453-472. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1529-8817.2000.99139.x>.
- Hwang EK, Gong YG, Ha DS and Park CS. 2010a. Inducing the regeneration and maturation of free-living gametophytes of *Ecklonia stolonifera* Okamura (Laminariales, Phaeophyta). J Kor Fish Soc 43, 231-238. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2010.43.3.231>.
- Hwang EK, Gong YG, Ha DS and Park CS. 2010b. Nursery and main culture conditions for mass cultivation of the brown Alga, *Ecklonia cava* Kjellman. J Kor Fish Soc 43, 687-692. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2010.43.6.687>.
- Hwang EK, Shim CH, Ha DS, Gong YG and Park CS. 2011. Regeneration and maturation induction of free-living gametophytes of *Undariopsis peterseniana* for their mass production. J Kor Fish Soc 44, 155-161. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2011.44.2.155>.
- Hwang EK, Hwang IK, Park EJ, Gong YG and Park CS. 2013a. Cultivation technique of *Ecklonia cava* Kjellman for restoration of natural resources. Kor J Environ Bio 31, 347-352. <http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2013.31.4.347>.
- Hwang EK, Gong YG, Hwang IK, Park EJ and Park CS. 2013b. Cultivation of the two perennial brown algae *Ecklonia cava* and *E. stolonifera* for abalone feeds in Korea. J Appl Phycol 25, 825-829. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-012-9941-y>.
- Iwahashi Y, Inaba S, Fushimi H, Sasaki T and Osuga H. 1979. Ecological studies on *Eisenia* and *Ecklonia* in the coast of Izu Peninsula. IV. The distribution and characteristics of kelp stand. Bull Shizuoka Pref Fish Exp Stn 13, 75-82.
- Kain JM. 1979. A view of the genus *Laminaria*. Oceanogr Mar Biol Ann Rev 17, 101-161.
- Kang RS and Yoo SJ. 1993. The acute toxicity of three oils to the early life stages of *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar. Korean J Phycol 8, 77-82.
- KHOA. 2009-2014. Seawater temperature statistics. Retrieved from [http://sms.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs\\_past\\_search\\_statistic.asp](http://sms.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs_past_search_statistic.asp) on January 7.
- Kim SY, Kim YM, Kim EJ and Lee MS. 2015. Synergistic antibacterial activity of *Ecklonia cava* extract against antibiotic resistant *Enterococcus faecalis*. J Kor Fish Soc 48, 51-57. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0051>.
- Kim YD, Shim JM, Park MS, Hong JP, Yoo HI, Min BH, Jin HJ, Yarish C and Kim JK. 2013. Size determination of *Ecklonia cava* for successful transplantation onto artificial seaweed reef. Algae 28, 365-369. <http://dx.doi.org/10.4490/algae.2013.28.4.365>.
- Ko YW, Sung GH, Yi CH, Kim HH, Choi DM, Ko YD, Lee WJ, Ko HB, Oak JH, Chung IK and Kim JH. 2008. Temporal variations of seaweed biomass in Korean coasts : Munseom, Jeju Island. Algae 23, 295-300. <http://dx.doi.org/10.4490/ALGAE.2008.23.4.295>.
- Komazawa I, Sakanishi Y and Tanaka J. 2014. Temperature requirements for growth and maturation of the warm temperate kelp *Eckloniopsis radicata* (Laminariales, Phaeophyta). Phycol Res 63, 64-71. <http://dx.doi.org/10.1111/pre.12068>.
- Lee JA and Brinkhuis BH. 1988. Seasonal light and temperature interaction effects on development of *Laminaria saccharina* (Phaeophyta) gametophytes and juvenile sporophytes. J Phycol 24, 181-191. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1529-8817.1988.tb04232.x>.
- Lüning K and Dring MJ. 1972. Reproduction induced by blue light in female gametophytes of *Laminaria saccharina*. Planta 104, 252-256. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00387080>.
- Mohring MB, Wernberg T, Wright JT, Connell SD and Russell BD. 2014. Biogeographic variation in temperature drivers performance of kelp gametophytes during warming. Mar Ecol Prog Ser 513, 85-96. <http://dx.doi.org/10.3354/meps10916>.
- Morita T, Kurashima A and Maegawa M. 2003. Temperature requirements for the growth and maturation of the gametophytes of *Undaria pinnatifida* and *U. undarioides* (Laminar-

- iales, Phaeophyceae). *Phycol Res* 51, 154-160. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1440-1835.2003.t01-1-00305.x>.
- NFRDI (National Fisheries Research & Development Institute). 2009. *Ecklonia cava* cultivation techniques. Busan, Korea, 30-33.
- Ohta M. 1988. Effects of water temperature on the growth and maturation of gametophytes and on the growth of juvenile sporophytes of *Eisenia bicyclis* (Kjellman) setchell and *Ecklonia cava* Kjellman (Phaeophyta, Laminariales). *Rep Mar Ecol Res Inst* 88202, 1-29.
- Peteiro C and Freire Ó. 2011. Effect of water motion on the cultivation of the commercial seaweed *Undaria pinnatifida* in a coastal bay of Galicia, northwest Spain. *Aquaculture* 314, 269-276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.02.009>.
- 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.
- Rothäusler E, Gómez I, Karsten U, Tala F and Thiel M. 2011. Physiological acclimation of floating *Macrocystis pyrifera* to temperature and irradiance ensures long-term persistence at the sea surface at mid-latitudes. *J Exp Mar Biol Ecol* 405, 33-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jembe.2011.05.018>.
- Serisawa Y, Yokohama Y, Aruga Y and Tanaka J. 2001. Photosynthesis and respiration in bladelets of *Ecklonia cava* Kjellman (Laminariales, Phaeophyta) in two localities with different temperature conditions. *Phycol Res* 49, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1440-1835.2001.00214.x>.
- Shea R and Chopin T. 2007. Effects of germanium dioxide, an inhibitor of diatom growth, on the microscopic laboratory cultivation stage of the kelp, *Laminaria saccharina*. *J Appl Phycol* 19, 27-32. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-006-9107-x>.
- Tanaka T, Yotsukura N, Kimura H and Notoya M. 2008. The effects of water temperature on growth and/or maturation of gametophytes and juvenile sporophytes of *Ecklonia cava* and *E. kurome* (Laminariales, Phaeophyta) growing in the coasts of Wakayama Prefecture. *Aquat Sci* 56, 343-349.
- 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>.
- Yokohama Y, Tanaka J and Chihara M. 1987. Productivity of the *Ecklonia cava* community in a bay of Izu Peninsula on the Pacific coast of Japan. *Bot Mag* 100, 129-141. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02488318>.
- Zhang L, Cui C, Li X, Zhang Z, Luo S, Liang G, Liu Y and Yang G. 2013. Effect of temperature on the development of *Saccharina japonica* gametophytes. *J Appl Phycol* 25, 261-267. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-012-9860-y>.