

수온과 광량에 따른 다시마 초기 생활사의 발아와 성장

강래선 · 고철환*

한국해양연구소 해양생물자원연구개발센터, *서울대학교 해양학과 및 해양연구소

Germination and Growth of *Laminaria japonica* (Phaeophyta) Microscopic Stages under Different Temperatures and Photon Irradiances

Rae-Seon KANG and Chul-Hwan KOH*

Marine Living Resources Research and Development Center, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

*Department of Oceanography and Research Institute of oceanography, Seoul National University, 151-742, Korea

Germination and growth of *Laminaria japonica* microscopic stages were investigated under crossed gradients of temperatures and irradiances, and the results related to the seasonal temperature regime in the southeastern coast of Korea. Germination rates of 70-86% were observed in the temperature range of 5-20°C, however, at 25°C no germination of meiospores was observed. The primary factor affecting germination rates at the temperature range of 5-20°C was irradiance; germination was significantly reduced at 150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Vegetative cell production of female gametophytes was highest at 20°C, but plants were not fertile at the temperature. In the temperature range of 5-15°C, higher irradiance caused females to reduce cell production, but increased fertility. Cell production was also low at lower temperatures with increased fertility rates. Optimal growth temperature for microsporophytes was 10°C and their growth rates were light-saturated at 70 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. We have concluded that meiospores released before July could develop to the young sporophytic stage in the southeastern coast of Korea which is off the southern limit of its geographical distribution. However, limiting factor in the development of natural sporophytic population in this region would be the upper temperature limit for the survival of young sporophytes, as water temperature at this area frequently exceeds 25°C during the summer period.

Key words: *Laminaria japonica*, microscopic stages, germination, growth, reproduction

서 론

다시마 (*Laminaria japonica* Areschoug)는 서로 다른 크기와 형태를 지닌 배우체와 포자체가 세대교번을 하는 다년생 해조이며 (Kanda, 1936), 우리 나라에서는 동해안 중부 이북의 연안에만 분포한다 (Lee, 1991).

지리적인 분포를 볼 때, 다시마는 분명히 아한대성 해조이다. 그러나 포자체는 그 지리적 분포범위를 벗어난 온대역에서도 충분히 자랄 수 있다 (Ohno and Critchley, 1997). 현재 우리 나라 동남해안에서는 인공적으로 배양한 어린 포자체로부터 많은 양의 포자체를 생산하고 있고, 또한 이들로부터 방출된 포자들이 해수 중에서 대규모 'seed rain'을 형성하고 있다. 그럼에도 이 해역에서 다시마가 자생할 수 없는 것은 이 해역의 수온이 포자, 배우체, 어린 포자체로 이어지는 초기 생활사 단계의 생존에 적합하지 않기 때문이라고 추론할 수 있다.

이 추론을 검증하는 직접적인 방법은 다시마 초기 생활사 단계의 생태생리를 이해하는 것이다. 특히 서로 다른 수온과 광량 하에서 이들의 반응을 파악하는 실내실험은 이 검증을 위한 가장 효율적인 방법으로, 지금까지 여러 종의 다시마류 식물에 관해 수행된 많은 연구에서도 주로 이 방법을 적용해 왔다 (Kain, 1965; Cosson, 1973; Bolton and Lüning, 1982; Bolton and Levitt, 1985; Okada et al., 1985; Lee and Brinkhuis, 1988; Egan et al., 1989; Han and Kain, 1996). 그러나 다시마에 관한 연구는 Okada et al. (1985) 뿐이며, 이 또한 수온에 따른 어린 포자체의 성장만을 다루었을 뿐이다.

본 연구에서는 여러 가지 수온과 광량 하에서 다시마 포자의 발아, 암배우체의 성장과 성숙, 그리고 어린 포자체의 성장을 조사하였다. 본 논문의 목적은 수온과 광량에 대한 다시마 초기 생활사 단계의 생리적 반응을 이해하는 기초자료를 제공하는 동시에, 이를 동남해의 수온특성과 연관하여 이 해역에서 자연 개체군이 발달하지 못하는 원인을 파악하는 것이다.

재료 및 방법

시료의 채집 및 실험조건.

1995년 6월과 8월에 각 1회씩 양식장에서 성숙한 포자엽을 채집하고, 여과해수 (0.45 μm)로 부드럽게 세척하여 표면의 이물질을 제거한 후, 실험실로 운반하였다. 운반한 포자엽 중에서 가장 성숙한 부위를 25 cm^2 크기의 질편으로 잘라 멸균해수로 다시 세척한 후, 10°C로 유지되는 어두운 곳에서 약 4시간 건조시켰다. 그런 다음, 500 ml의 멸균해수가 든 비커에 엽체를 넣고, 피펫으로 가볍게 저어 포자의 방출을 유도하였다. 포자를 방출시킬 때의 수온과 광량은 각각 15°C 및 10~20 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 였다. 혈구계수기를 이용하여 포자용액내 포자의 밀도를 조사하였고, 약 30 개체 $\cdot \text{mm}^{-2}$ 의 밀도로 배양용기에 접종하였다.

배양용액으로는 PES 배지 (Provasoli, 1968)를 첨가한 멸균해수를 이용하였다. 또한 부착성 규조류의 번식에 의한 실험의 오류를 방지하기 위해 Ge O_2 (PES 배지 1 l당 1 ml 첨가)를 배양용액에 첨가하였다 (Bolton and Levitt, 1985). 배양용액은 일주일 간격으로 교환하였다.

수온과 광조건을 만드는 원리는 Yarish et al. (1979)의 방법과 유사하였다. 다만 본 연구에서는 water circulator ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)와 $25 \times 20 \times 150 \text{ cm}^3$ 크기의 수조를 이용하여 수온을 조절하였다. 광원으로는 $250 \text{ Watt} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 HQI lamp를 이용하였다. 광주기는 여름철 일조시간을 고려하여 14:10 h LD로 유지하였다.

포자의 발아와 배우체의 성장 및 성숙에 관한 실험은 6월과 8월, 그리고 포자체의 성장에 관한 실험은 7월과 9월에 각 1회씩 실시하였다.

포자의 발아.

수온 5단계 (5, 10, 15, 20, $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$)와 광량 4단계 (10, 30, 70, $150 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)로 맞춘 총 20개의 조건에서 실험하였다. 우선, 준비한 포자용액을 60 ml 크기의 Falcon culture flask ($n=60$)에 접종하였다. 접종 후에는 flask를 각 실험조건으로 옮겨 48시간 배양하였다. 각 조건별로 3개의 복제구를 두었다. 배양이 끝난 뒤에는 flask의 밑면에 지름 1 cm의 임의 면적 (이하 관찰점)을 각 3개씩 선택하고, 관찰점에 존재하는 포자 중에서 germ tube를 형성한 개체의 백분율을 조사하여 각 조건에서 나타난 발아율을 비교하였다.

배우체의 성장 및 성숙.

수온 4단계 (5, 10, 15, 20°C)와 광량 4단계 (10, 30, 70, $150 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)로 맞춘 총 16개의 조건에서 실험하였다. 준비한 포자용액을 23 ml 용량의 petri dish ($n=48$)에 접종하고, 15°C 와 $10 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 연속광으로 24시간 배양하여 포자를 발아시켰다. 그런 다음, 각 3개씩의 petri dish를 1 l의 배양용액이 든 비커 (2 l)에 넣고, 이 비커를 다시 각 조건에서 4주간 배양하였다.

포자체를 생성하는 것은 암배우체이기 때문에 이들을 대상으로 성장과 성숙을 비교하였다. 특히 암배우체는 성장조건에 따라 다양하게 반응하며, 여러 개의 세포로 분화할 수 있는 실험조건에서 하나의 primary cell에서 분화된 세포들은 동시에 성숙하지 않고, 자원을 일찍 배분 받은 순서에 따라 성숙한다. 또한 발생한 난 중에서 그 일부는 포자체로 발달하지 못하고 없어지기 때문에 포자 접종 후 2~3주부터 배우체를 식별하기 어렵다. 따라서 포자를 접종한 7일 후에는 petri dish 밑면에 관찰점을 각 1~2개씩 표시하고, 여기에 존재하는 배우체의 개체수 (I_0)를 조사하였다. 그런 다음, 일주일 간격으로 각 관찰점에 존재하는 배우체의 영양세포와 포자체의 수를 조사하였고, 이를 다시 I_0 로 나누어 하나의 암배우체가 생산하는 영양세포의 수와 포자체의 수로 표준화하였다 (Bolton and Levitt, 1985). 암배우체에서 발생한 난은 편의상 하나의 어린 포자체로 간주하였다. 하나의 암배우체가 생산하는 총 세포수 (TCP_i)와 성숙률 (FER_i)은 다음과 같이 구하였다.

$$\text{TCP}_i = \text{GAME}_i + \text{SPO}_i \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{FER}_i (\%) = (\text{SPO}_i / \text{TCP}_i) \cdot 100 \dots\dots\dots (2)$$

어린 포자체의 성장.

수온 4단계 (5, 10, 15, 20°C)와 광량 3단계 (10, 30, $70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)로 맞춘 총 12개의 조건에서 실험하였다. 우선, petri dish ($n=$

24)에 영양 세포인 상태로 부착한 배우체를 수온 10°C 에서 $30 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 연속 광량으로 일주간 배양하여 어린 포자체를 발아시켰다. 이후, 2개씩의 petri dish를 1 l의 배양용액이 든 비커에 투입하고, 이를 다시 각 실험조건에서 20일간 배양하였다. 실험이 끝난 뒤에는 petri dish별로 2개씩의 관찰점을 선택하였고, 각 관찰점 내에서 가장 큰 5개체의 엽장을 측정하였다.

자료처리 및 분석.

자료분석 시에는 6월과 9월 사이에 각 1회씩 2회 실험한 결과를 종합하였다. 자료는 mean \pm 1 SD로 나타내었다. 실험조건간 반응의 차이는 분산분석 (two-way ANOVA)으로 비교하였고, 두 집단간의 차이는 Turkey multiple comparison test로써 비교하였다 (Zar, 1984).

결 과

포자의 발아.

수온 25°C 에서 다시마의 포자는 전혀 발아하지 않았다. 그러나 $5 \sim 20^\circ\text{C}$ 범위 내에서는 광량에 따라 70.2~85.7%의 발아율을 보였다 (Fig. 1). 또한 이 수온범위에서 $10 \sim 70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서의 발아율은 82.6~85.7%로 광량간 유의한 차이가 없었으나, $150 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 발아율은 70.2~73.6%로 $70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하의 빛조건에서 배양한 개체들의 발아율에 비해 유의하게 낮았다 (Turkey multiple comparison, $p < 0.001$).

배우체의 성장과 성숙.

배우체의 성장과 성숙은 수온과 광량에 따라 각기 다르게 나타났다 (Fig. 2). 하나의 암배우체에서 생산하는 영양세포의 수는 20°C 에서 가장 많았다. 그러나 20°C 에서는 암배우체로부터 어린 포자체가 전혀 발아하지 않았다. 20°C 에서 영양세포의 수는 적은 광량으로 배양할수록 많아지는 경향을 보였다. 또한 $30 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하의 광량으로 배양한 집단에서는 영양세포의 수가 시간경과에

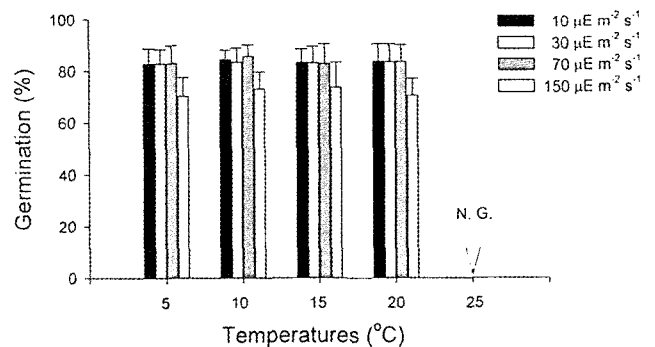


Fig. 1. *Laminaria japonica*. Percent germination of meiospores under different temperature-irradiance conditions. Germination rates were calculated on the basis of germ tube production 48 hours after meiospore inoculation. Data are from two sets of experiments conducted in June and August, 1995. Vertical bar means standard deviation.

따라 증가하였으나, $70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상에서는 증가 후 감소하거나 또는 지속적으로 감소하였다. 이 결과는 다시마의 배우체가 음식식물로 많은 광량에서는 성장이 저해됨을 나타낸다. 어린 포자체가 발아하는 $5\sim 15^\circ\text{C}$ 에서는 시간경과에 따라 영양세포의 수가 감소하는 반면, 포자체의 수는 증가하였다. 이것은 영양세포가 성숙함에 따라 포자체의 수가 증가하였기 때문이다. 그리고, 이러한 변화 속에서도 영양세포의 수는 수온이 높을수록 많아지는 경향을 보였다. 즉 15°C 에서 영양세포의 수는 $5 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 최대 5.45개였으나, 5°C 에서는 모든 빛조건에서 1.0개 이상을 넘지 않았다. 그러므로 배양 28일 후의 포자체의 수 또한 15°C 에서 가장 많았고, 5°C 에서 가장 적었다. $5\sim 15^\circ\text{C}$ 에서는 공통적으로 많은 광량으로 배양한 집단일수록 영양세포의 수가 빨리 감소하였고, 반면 포자체의 수는 빨리 증가하였다. 또한 $70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하의 빛조건에서, $5\sim 10^\circ\text{C}$ 의 영양세포의 수는 대체로 시간경과에 따라 지속적으로 감소하였으나, 15°C 에서는 영양세포의 수가 지속적으로 증가하거나 또는 증가한 후 감소하였다. 이것은 배우체가 성숙할 수 있는 수온 및 광량 하에서도 수온이 낮거나 또는 광량이 많을수록 배우체가 빨리 성숙하여 영양세포의 생산량이 적어지는 대신, 포자체가 빨리 생성됨을 나타낸다.

배양 28일째 암배우체가 생성하는 총세포수는 $0.8\sim 16.8$ 개로 높은 수온으로 배양할수록 많았다. 총세포수가 1.0 이하의 값을

보이는 것은 초기 개체수 중 그 일부가 영양세포에서 어린 포자체로 발달하는 과정에서 사망하였기 때문이다. 광량 또한 배우체의 성장에 많은 영향을 미쳤다. 모든 수온에서 총세포수는 적은 광량으로 배양할수록 많았다 (Fig. 3a). 성숙률은 일차적으로 수온에 의해 많은 영향을 받았다. 20°C 에서 성숙률은 모든 빛조건에서 0%였고, 15°C 에서 성숙률은 $150 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 경우를 제외하고 10°C 이하의 성숙률에 비해 항상 낮았다. $5\sim 15^\circ\text{C}$ 에서 공통적인 현상으로, $10 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 성숙률은 $30 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상에 비해 현저하게 낮았다 (Fig. 3b).

암배우체의 성장과 성숙에 대한 위의 결과는 두 반응간에 음의 상관관계가 있음을 나타내고 있다. 즉 낮은 수온에서는 배우체가 빨리 성숙하는 쪽으로 에너지를 집중시키기 때문에 영양세포를 거의 증가시키지 않는 반면, 높은 수온에서는 배우체가 성숙할 수 없기 때문에 획득한 에너지를 영양세포의 형성에 집중시켰다. 수온에 비해서는 두 반응간의 관계가 약하지만, 광량 또한 성장과 성숙간에 음의 관계를 유발하는 중요한 요인이었다. 두 반응간의 관계는 각 수온별로 성숙률에 대한 총세포수의 회귀관계로부터 보다 명확하게 알 수 있다. 분석에 사용한 자료는 28일째 $5\sim 15^\circ\text{C}$ 의 성숙률과 총세포수이다. 직선회귀로 구한 기울기는 $-0.011\sim -0.074$ 로 모두 음의 값을 나타내었다 (Fig. 4).

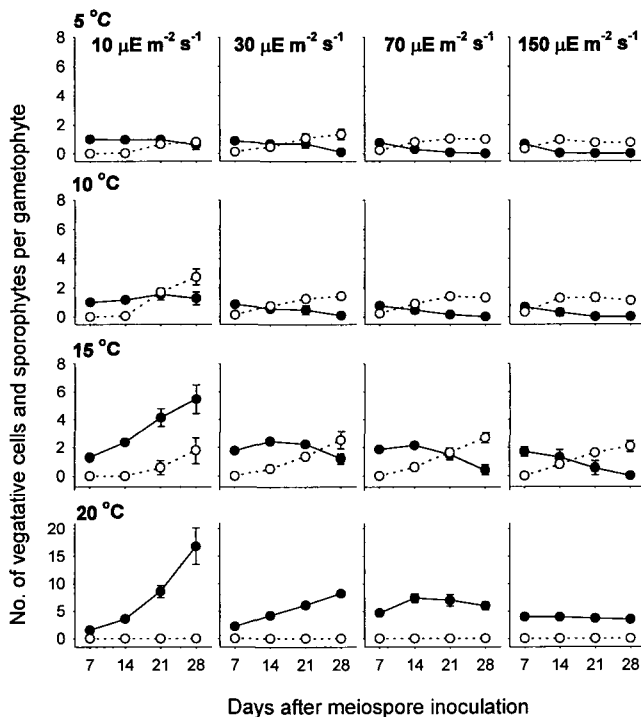


Fig. 2. *Laminaria japonica*. Changes in number of vegetative cells (closed circle) and sporophytes (open circle) per female gametophyte under different temperature-irradiance conditions. All data were standardized by the number of gametophytes at 7 days after meiospore inoculation. Data are from two sets of experiments conducted in June and August, 1995. Vertical bar means standard deviation.

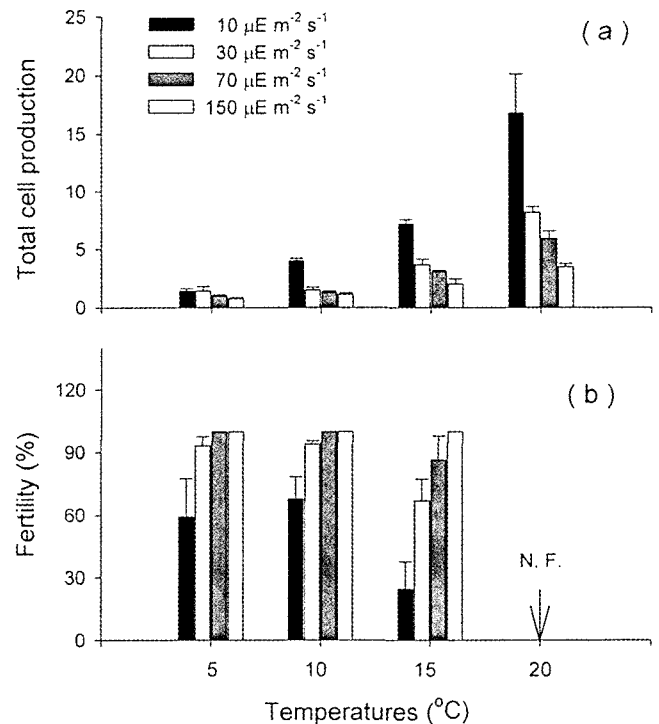


Fig. 3. *Laminaria japonica*. Total cell production (a) and fertility (b) of female gametophyte under different temperature-irradiance conditions at 28 days after meiospore inoculation. TCP means total number of vegetative cells and sporophytes produced from a female gametophyte and fertility means the ratio of sporophytes to TCP. Vertical bar means standard deviation. N. F.: not fertile.

어린 포자체의 성장.

어린 포자체의 성장은 수온과 광량에 의해 많은 영향을 받았다. 모든 수온에서 공통적인 현상으로 $10 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 배양한 엽체의 크기는 $30 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 빛조건으로 배양한 엽체에 비해 현저하게 작았고, 광량이 증가할수록 엽장이 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 5).

엽체의 성장은 일차적으로 광량에 의해 많은 영향을 받는 것으로 나타났다 (Table 1a). 특히 5°C와 20°C에서 $70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 빛조건에서 성장한 엽체의 크기는 $30 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 성장한 엽체에 비해 유의하게 컸다. 그러나 10°C와 15°C에서는 두 빛조건에서 성장한 엽체들간에 유의한 크기 차이를 볼 수 없었다. 이 결과는 어린 포자체의 성장이 대체로 $30 \sim 70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 포화될 수 있음을 나타낸다. 수온 또한 포자체의 성장에 많은 영향을 미쳤다. 10°C에서 배양한 엽체들의 성장상태는 다른 수온으로 배양한 개체

들에 비해 상대적으로 좋았고, 특히 10°C에서 $70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 빛으로 배양한 개체들의 크기는 다른 수온에서 동일한 광량으로 배양한 개체들에 비해 컸다. 그러나 $10 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서는 수온간 유의한 차이를 보이지 않았다. 이 결과는 충분한 양의 광량 하에서는 엽체의 성장이 수온간에 뚜렷한 차이를 나타내지만, 광량이 충분하지 못한 조건에서는 수온간 뚜렷한 차이를 보이지 않는 다라는 것을 나타낸다 (Table 1b).

고찰

포자의 발아율.

다시마의 포자는 25°C의 고수온에서 전혀 발아하지 않았다. 고수온에서 포자의 발아율이 현저하게 낮아지는 것은 *Laminaria longicruris* (Egan et al., 1989)와 *Laminaria saccharina* (Lee and Brinkhuis, 1988)에서도 볼 수 있다. 또한 본 연구에서는 $10 \sim 70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 포자의 발아율이 광량간 유의한 차이를 보이지 않았지만, $150 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 발아율은 $70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하

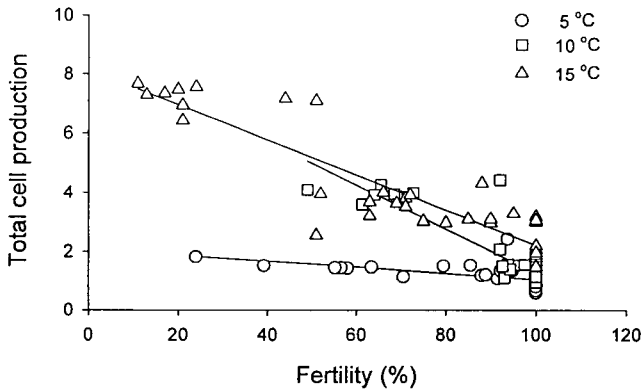


Fig. 4. *Laminaria japonica*. Relationships between fertility and total cell production of female gametophytes at 28 days after meiospore inoculation. The relationships under 5°C, 10°C, and 15°C were $Y = 2.09 - 0.011 \cdot X$ ($r^2 = 0.31$, $p < 0.001$), $Y = 8.67 - 0.074 \cdot X$ ($r^2 = 0.80$, $p < 0.001$), and $Y = 8.14 - 0.059 \cdot X$ ($r^2 = 0.82$, $p < 0.001$), respectively.

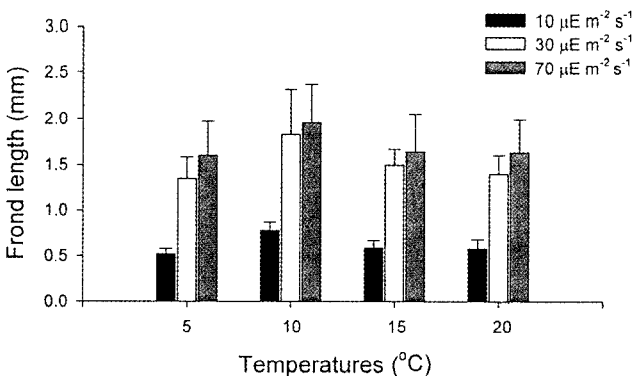


Fig. 5. *Laminaria japonica*. Frond length of sporophytes under different temperature-irradiance conditions. Frond length was measured for five largest plants in each condition at 20 days after microsporophyte development. Data are from two sets of experiments conducted in July and September, 1995. Vertical bar means standard deviation.

Table 1. *Laminaria japonica*. Analysis of variance for frond length of five largest microsporophytes grown at different temperature-irradiance conditions.

(a) Two-way ANOVA

Source	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean squares	F	P
Temp.	3	9.6	3.21	37.7	<<0.01
Irradiance	2	109.2	54.61	642.5	<<0.01
Interaction	6	0.8	0.14	1.6	>0.05
Error	468	39.6	0.09		
Total	479	159.2			

(b) Turkey multiple comparison (SE=1.9791, $q_{0.05, 468, 12} = 4.622$)

Temp	5°C			10°C			15°C			20°C			
	QI ¹	10	30	70	10	30	70	10	30	70	10	30	70
5°C	10												
	30	18.0 ²											
	70	23.5	5.4										
10°C	10	5.7	12.4	17.8									
	30	28.5	10.4	5.0	22.8								
	70	31.3	13.3	7.8	25.7	2.8							
15°C	10	1.5	16.5	22.0	4.1	27.0	29.8						
	30	21.3	3.3	2.2	15.7	7.2	10.0	19.8					
	70	24.3	6.3	0.9	18.7	4.1	7.0	22.8	3.0				
20°C	10	1.3	16.7	22.2	4.3	27.2	30.0	0.2	20.0	23.0			
	30	19.1	1.1	4.3	13.5	9.3	12.2	17.6	2.2	5.2	17.8		
	70	24.1	6.1	0.7	18.5	4.3	7.2	22.6	2.8	0.2	22.8	5.0	

¹quantum irradiances ($\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

²values in matrix are q and values above 4.622 mean significantly different.

에서의 발아율에 비해 낮았다. 이 결과는 광량이 포자의 발아율에 영향을 미치지 않는다는 다수의 연구 (Lee and Brinkhuis, 1988; Egan et al., 1989; Lee, 1992)와 대비된다. 그러나 이들 연구에서는 단지 $120 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하의 광량에서만 포자의 발아율을 조사하였다. Cosson (1973)만이 $150 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서 포자의 생존율을 조사하였고, 약 $170 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서는 *Laminaria digitata* 포자의 생존율이 현저하게 낮아짐을 보고하고 있다.

물론 발아율의 높고 낮음이 실험된 개체들의 사망을 의미하는 것은 아니다. 실험과정 중에는 수온 25°C 또는 $150 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 조건하에서도 발아하지 못한 다수의 포자들이 여전히 생존함을 볼 수 있었다. 그러나 떠다니는 포자의 발아율이 낮아진다는 것은 고착성인 엽상체로 발달하는 시간이 늦어진다는 점에 그 중요성이 있다. 늦게 발아할수록 빨리 발아한 개체에 비해 해수유동에 의해 더 빨리 떠 밀려가거나, 또는 빨리 발아한 개체들에 의해 자원을 선점 당할 가능성이 높아, 결국 사망할 확률이 높아진다.

배우체의 성장과 성숙.

다시마의 암배우체는 수온 20°C 에서 전혀 성숙하지 않았고, 영양성장만을 계속 하였다. 다시마속 식물에 있어 20°C 이상의 고수온에서 암배우체가 성숙하지 않는 것은 매우 일반적인 현상이다 (Lee and Brinkhuis, 1988; Bolton and Lüning, 1982; Lee, 1992). 또한 20°C 에서 암배우체가 생성하는 총세포수는 $10 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 가장 많았으며, 이는 기존에 보고된 결과들과 크게 다르지 않다. 즉, *Laminaria hyperborea*, *L. saccharina*, *L. digitata*에서 암배우체의 영양성장은 $20 \sim 30 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 더 이상 진행되지 않으며 (Lüning, 1980), *Laminaria farlowii*에서도 암배우체의 성장은 $40 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서는 저해된다고 알려져 있다 (Lüning and Neushul, 1978).

암배우체가 성숙하는 $5 \sim 15^\circ\text{C}$ 에서는 광량이 적을수록 성숙률이 낮고 영양세포의 생산량이 많아졌다. 이러한 현상은 *Eklonia maxima*에서도 볼 수 있다 (Bolton and Levitt, 1985). 그리고 수온 12°C 에서 24시간 연속적으로 빛을 비추어 25일간 배양한 *L. digitata*의 암배우체에서도 영양세포의 수는 배우체의 성숙률이 낮은 $5 \sim 10 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 가장 많고, 성숙률이 높아지는 $20 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서는 감소한다고 알려져 있다 (Cosson, 1975).

암배우체의 성장과 성숙은 수온에 의해서도 큰 영향을 받았다. $5 \sim 15^\circ\text{C}$ 의 범위에서 수온이 높아질수록 성숙률이 낮아지고, 생성한 영양세포의 수는 많아졌다. *E. maxima*에서도 $60 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 $5 \sim 22.5^\circ\text{C}$ 로 배양한 암배우체의 영양세포의 수는 수온이 높아짐에 따라 증가하는 반면, 성숙률은 낮아진다 (Bolton and Levitt, 1985). 또한 *L. saccharina* (Lee and Brinkhuis, 1988)와 *L. longicirris* (Egan et al., 1989)에서도 수온이 높아질수록 암배우체의 크기가 증가하나, 반면 성숙률은 낮아진다.

이상의 결과는 어린 포자체의 가입과 개체군 유지라는 측면에서 중요한 의미를 갖는다. 수온과 광량이 적합하지 못해 배우체로부터 어린 포자체가 발달하기까지의 시간이 길어질수록 소형동물에 의한 초식, 다른 해조류에 의한 경쟁, 퇴적물에 의한 파문힘에 의해 사망할 가능성이 그 만큼 증가하기 때문에 빠른 시간 내에 포자체

로 발달하는 것이 개체군의 크기 유지에 보다 유리할 것이다.

어린 포자체의 성장.

본 조사에서 10°C 에서 $30 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서 배양한 어린 포자체의 성장은 다른 수온에서 동일한 광량으로 배양한 개체들에 비해 좋았다. 이점은 갖 발생한 다시마의 포자체의 성장적 온은 $8 \sim 18^\circ\text{C}$ 이며, 특히 13°C 에서의 성장률이 8°C 와 18°C 에 비해 약간 높고 20°C 에서는 성장률이 심각하게 저해된다는 Okada et al. (1985)의 결과와 유사하다. Cosson (1973)과 Kain (1965)에서도 *L. hyperborea*의 포자체의 성장적 온은 10°C 이상이며, 5°C 이하와 20°C 이상에서는 성장률이 심각하게 저해된다고 보고하고 있다.

광량 또한 어린 포자체의 성장에 많은 영향을 미쳤다. $10 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 성장한 개체들의 엽장은 $30 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상에서 성장한 개체들에 비해 현저하게 작았다. 그러나 $30 \sim 70 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서는 어린 포자체의 성장이 충분히 이루어지는 것으로 나타났고, 이는 *L. digitata*, *L. hyperborea*, *L. saccharina*의 어린 포자체의 상대성장률은 $30 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 까지는 광량이 증가함에 따라 높아지나, 이보다 많은 광량에서는 더 이상 높아지지 않거나 또는 감소한다는 Han and Kain (1996)의 결과와도 잘 일치한다.

동남해안에서 초기 생활사 단계의 발아.

동남해안에서 다시마 개체군이 자생하지 않는 이유를 파악하기 위해, 다시마 양식장이 대규모로 존재하는 일광연안의 수온특성과 수온에 대한 다시마 초기 생활사 단계의 반응을 연관하여 해석하고자 하였다. 이를 위해, Kang (1999)에 나타난 일광 연안에서 양식 다시마의 엽장, 성숙률, 그리고 수온의 변화를 동일한 시간 축에 나타내었다 (Fig. 6). 이 해역에서 성장한 포자체는 평균수온이 14°C 이상으로 되는 4월부터 성숙하기 시작하여 6월부터 본격적으로 포자를 형성하며, 23°C 에 이르는 8월 이후로는 완전히 녹아든다. 7월까지의 수온이 18°C 이하이기 때문에 이 시기에 방출된 포자는 발아하여 배우체로 자라며, 성숙한 배우체로부터 어린 포자체가 발아할 수 있다. 이점은 1996년 7월 현장조사시 다시마 양성줄에 새로 가입한 포자체 (최대크기: 70 cm)가 흔하게 발견된다는 사실로부터 입증될 수 있다. 이처럼 이 지역에서 4월부터 방출된 포자가 배우체로 거쳐 어린 포자체로 발아 또는 가입할 수 있다는 것은 새로운 발견이다. 그러나 가입된 어린 포자체도 그들의 모체와 마찬가지로 수온이 23°C 이상으로 상승하는 8월 이후에는 모두 사망하게 된다. 또한 수온이 20°C 이상에 이르는 시기에 방출된 포자들은 대부분 발아하지 못하거나 또는 발아하더라도 배우체가 성숙하지 못함에 따라 사망하게 된다. 결국, 이 지역에서 어린 포자체가 가입할 수 있는 조건임에도 자연 개체군이 존속할 수 없는 이유는 여름철 높은 수온에 의한 포자체의 사망으로 요약할 수 있다.

요 약

여러 가지 수온과 광량 하에서 다시마 포자의 발아, 암배우체의 성장과 성숙, 그리고 어린 포자체의 성장을 조사하였고, 이 결과를 동남해안의 수온과 특성과 결부하여 해석하였다. 수온 25°C 에서

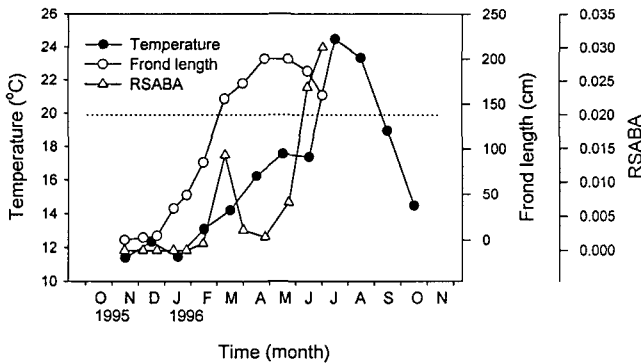


Fig. 6. Seasonal variations in seawater temperature and frond length and fertility (ratio of sorus area to blade area, RSABA) of sporophytes on the coast of Ilkwang, Korea from October 1995 to October 1996.

포자들은 전혀 발아하지 않았다. 5~20°C에서의 발아율은 70~86%였다. 5~20°C에서 포자의 발아율은 광량에 따라 달랐다. 150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 배양한 포자의 발아율은 70 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하에서 배양한 포자의 발아율에 비해 낮았다. 암배우체는 20°C에서 영양세포를 가장 많이 형성하였으나, 이 수온에서는 성숙하지 않았다. 수온 5~15°C에서는 광량이 증가할수록 영양세포의 생산량이 줄어들었으나, 성숙률은 오히려 높아졌다. 또한 수온이 낮아질수록 성숙률은 높아졌으나, 반면 영양세포의 생산량은 줄어들었다. 어린 포자체의 성장에 대한 최적수온은 10°C였으며, 70 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량은 어린 포자체의 성장하기에 충분한 광량으로 판단되었다. 동남해안의 수온특성을 볼 때, 다시마의 지리적 분포를 벗어난 이 지역에서도 7월 이전에 방출된 포자는 배우체를 거쳐 어린 포자체로 발달할 수 있다. 그러나 이러한 조건 속에서도 자연 개체군이 존속할 수 없는 이유는 여름철 높은 수온에 의한 어린 포자체의 사망으로 요약할 수 있다.

참 고 문 헌

Bolton, J.J. and G.J. Levitt. 1985. Light and temperature requirements for growth and reproduction in gametophytes of *Ecklonia maxima* (Alariaceae: Laminariales). Mar. Biol., 87, 131~135.
 Bolton, J.J. and K. Lüning. 1982. Optimal growth and maximal survival temperatures of Atlantic Laminaria species (Phaeophyta) in culture. Mar. Biol., 66, 89~94.
 Cosson, J. 1973. Action de la température et de la lumière sur le développement du gamétophyte de la *Laminaria digitata* (L.) Lam. (Phéophycée, Laminariales). C. R. Acad. Sci. Ser. D., 276, 973~975
 Cosson, J. 1975. Action des conditions de culture sur la croissance des gamétophyte de la *Laminaria digitata* (L.) Lamouroux (Phéophycée, Laminariales). Bull. Soc. Phycol. Fr., 20, 50~54.

Egan, B., A. Blasto and C. Yarish. 1989. Seasonal acclimation to temperature and light in *Laminaria longicruris* de la Pyl. (Phaeophyta). J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 129, 1~16.
 Han, T. and J.M. Kain. 1996. Effect of photon irradiance and photoperiod on young sporophytes of four species of the Laminariales. Eur. J. Phycol., 31, 233~240.
 Kain, J.M. 1965. Aspects of the biology of *Laminaria hyperborea*. IV. growth of early sporophytes. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 45, 129~143.
 Kanda T. 1936. On the gametophytes of some Japanese species of Laminariales. Sci. Pap. Inst. Alg. Res. Fac., Hokkaido Imp. Univ., 1, 221~260.
 Kang, R.S. 1999. A study on the germination, growth, and production of *Laminaria japonica* Areschoug (Phaeophyta) from the eastern coast of Korea. Ph. D. Thesis, Seoul National University, Korea, 152 pp.
 Lee, J.A. 1992. Gametogenesis and early sporophytes development of *Laminaria religiosa* Miyabe in the East Coast of Korea. Kor. J. Phycol., 7, 109~119.
 Lee, J.A. and B.H. Brinkhuis. 1988. Seasonal light and temperature interaction effects on development of *Laminaria saccharina* (Phaeophyta) gametophytes and juvenile sporophytes. J. Phycol., 24, 181~191.
 Lee, J.W. 1991. Community structure and geographical distribution of intertidal benthic algae in the east coast of Korea. Ph. D. Thesis, Seoul National University, Korea, 210 pp.
 Lüning, K. 1980. Critical levels of light and temperature regulating the gametogenesis of three species *Laminaria* (Phaeophyceae). J. Phycol., 16, 1~15.
 Lüning, K. and M. Neushul. 1978. Light and temperature demands for growth and reproduction of *Laminaria* gametophytes in southern and central California. Mar. Biol., 45, 297~309.
 Ohno, M and A.T. Critchley. 1997. Seaweed cultivation and marine ranching. Kanagawa International Fisheries Training Centre, JICA, 151 pp.
 Okada, Y., Y. Sanbonsuga and Y. Machiguchi. 1985. The effects of temperature on the growth and shape of the early sporophytes of *Laminaria japonica*, *L. ochotensis*, *L. diabolica*, *L. religiosa* and *L. angustata* var. *longissima* in culture. Bull. Hokkaido Reg. Fish. Res. Lab., 50, 27~44.
 Provasoli, L. 1968. Media and prospects for cultivation of marine algae. In Watanabe, A. and A. Hattori, (Eds.), Cultures and collections of algae. Proc. U. S. - Jpn. Conf. Hakone. Jap. Soc. Plant Physiol., 63~75.
 Yarish, C., K.W. Lee and P. Edwards. 1979. An improved apparatus for the culture of algae under varying regimes of temperature and light intensity. Bot. Mar., 22, 395~397.
 Zar, J.H. 1984. Biostatistical analysis. Prentice-Hall Inc., N. J., U.S.A., 718 pp.

1999년 3월 17일 접수
 1999년 6월 30일 수리