

수온, 조도, 영양염이 방사무늬김(*Pyropia yezoensis*)과 잇바디돌김(*Pyropia dentata*)의 사상체 생장 및 성숙에 미치는 영향

서혜민 · 한이윤 · 이우진 · 임현지 · 박은정*

국립부경대학교 해양생물학과

Effects of Temperature, Irradiance and Nutrients on the Growth and Maturation of Conchocelis in *Pyropia yezoensis* and *Pyropia dentata*

Hye-Min Seo, Lee-Yoon Han, Woo-Jin Lee, Hyun-Ji Im and Eun-Jeong Park*

Department of Marine Biology, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

The effects of temperature (10–30 °C), irradiance (0, 20, and 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), and nutrient regime on the growth and maturation of the conchocelis of *Pyropia yezoensis* and *Pyropia dentata* were studied. Both species exhibited vigorous growth under specific temperature conditions, with optimal growth at 15 and 25 °C for *P. yezoensis* and *P. dentata*, respectively. Complete mortality was observed at 30°C, and growth was inhibited; however, the cells remained viable under complete darkness. Conchocelis growth was inhibited and conchosporangial formation was delayed under nonenriched conditions compared with under nutrient enriched treatments. Conchosporangia were observed in *P. yezoensis* at 20–25°C, and in *P. dentata* under all temperature conditions except 10°C. Temperature, irradiance, and nutrients interactively influenced conchocelis development. These findings provide a basis for understanding stress tolerance of the microscopic stage in *Pyropia* species under changing marine conditions. This study has practical implications for establishing effective seed production systems and conservation strategies for natural *Pyropia* populations, contributing to the sustainable management of *Pyropia* aquaculture under future climate scenarios.

Keywords: *Pyropia yezoensis*, *Pyropia dentata*, Conchocelis, Environmental condition, Growth and maturation

서론

김속(Genus)은 홍조식물문(Rhodophyta), 김파래홍조강(Rhodophyceae), 김파래목(Bangiales), 김파래과(Bangiaceae)에 속하며, 전 세계적으로 188종, 국내에는 총 25종이 보고되어 있다(MABIK, 2025). 이들 중 일부 종은 동북아시아 지역에서 경제적으로 매우 중요하며, 특히 우리나라에서는 고부가가치 수산물로서 해조류 양식 산업의 핵심을 이루고 있다. 국내 김 산업은 전체 6조원의 규모로 추정되며, 양식종으로는 방사무늬김(*Pyropia yezoensis*), 잇바디돌김(*Pyropia dentata*), 모무늬돌김(*Pyropia seriata*)이 있다. 2024년 기준, 생산량은 약 55만톤이며, 수출액은 1.3조원으로 수산물 중 가장 높은 실적을 기록하였다(MOF, 2024). 이에 따라 김 산업의 지속적인 성장과 발전

을 위해서는 안정적인 생산량 확보가 필수적이다.

그러나 최근 기후변화에 의한 해수온 상승이 김의 생산량에 직접적인 영향을 미치고 있다(Le et al., 2018; Tulandi and Tummangkeng, 2021). 김과 같은 해조류는 기후 변화에 대한 취약성이 높은 수준이었으며(Kim et al., 2019), 광환경의 변화도 김의 생장에 영향을 미치는 요인으로 작용한다(Li et al., 2010; Zhong et al., 2023). 유효 광량의 감소는 김의 광합성 활성과 생장 저해로 이어질 수 있다(Ma et al., 2020). 또한 지난 27년간(1995–2021) 우리나라 연안 및 외해 표층의 성층강화 및 육수 유입량 변화로 질산염과 인산염 농도가 감소하고 있다(Park et al., 2023). 이러한 영양염 감소는 황백화 현상을 초래하여 김 양식생산량과 품질 저하의 주요 원인으로 보고되었다(Amano and Noda, 1987; Sakaguchi et al., 2003; Nishikawa and Ya-

*Corresponding author: Tel: +82. 51.629. 5922 Fax: +82. 51. 629. 5920

E-mail address: ejpark@pknu.ac.kr



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.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0445>

Korean J Fish Aquat Sci 58(4), 445-452, August 2025

Received 20 June 2025; Revised 15 July 2025; Accepted 11 August 2025

저자 직위: 서혜민(대학원생), 한이윤(대학원생), 이우진(대학생), 임현지(대학생), 박은정(교수)

maguchi, 2006).

김의 안정적 생산과 자연 개체군의 보전을 위해서는 엽체(배우체, n)를 형성하는 사상체(포자체, 2n) 단계의 환경 내성에 대한 구멍이 선행되어야 하며, 이는 안정적인 종자생산 체계 구축의 기반이 될 수 있다. 선행 연구에 따르면 사상체의 최적 성장 및 성숙 조건은 종 및 품종에 따라 상이하게 나타나는 것으로 보고되었다(Notoya et al., 1993; Kim, 1999; Kim and Notoya, 2004; He and Yarish, 2006). 김의 성장에 영향을 미치는 주요 환경 요인으로는 수온, 조도, 광주기, 영양염, 염분 등이 있으며, 이러한 환경 요인의 변화는 생장률, 성숙 시기, 포자 발아 등 김의 생리적 특성에 직접적인 영향을 미친다(Tada et al., 2010; Kim et al., 2012; Cui et al., 2015). 그러나 대부분의 선행 연구는 배우체 단계의 최적 성장 및 성숙 조건을 구명하기 위해 이루어졌으며(Lee et al., 2019; Ma et al., 2020; Yin et al., 2022), 포자체 단계의 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고수온, 암조건 및 영양염 결핍과 같은 극한 환경이 김속 사상체의 성장 및 성숙에 미치는 영향을 밝히고자 하였다. 이를 위해 다음의 두 가지 가설을 설정하였다; (1) 영양염 결핍 조건에서는 사상체의 생장이 저해되며 성숙하지 않을 것이다. (2) 광이 없는 암조건과 고수온 환경에서는 사상체가 사멸할 것이다. 본 연구에서는 위의 가설을 검증하기 위해 다양한 환경 조건에서 국내 주요 양식종인 방사무늬김(*P. yezoensis*)과 잇바디돌김(*P. dentata*) 사상체의 성장 및 성숙 특성을 확인하였다.

재료 및 방법

실험 재료 준비

방사무늬김(*P. yezoensis*)과 잇바디돌김(*P. dentata*)의 엽체는 각각 전라남도 해남군 어란리, 전라남도 진도군 회동에서 채집하였다. 채집한 엽체는 멸균해수로 세척한 뒤 성숙한 부위(1 × 1 cm)를 절단하여 Provasoli's enriched seawater (Provasoli, 1968) 배지가 담긴 페트리디쉬에 넣고 과포자 방출을 유도하였다. 발아한 사상체는 PES 배지가 담긴 플라스크에 옮겨 수온 20°C, 조도 20 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 광주기 14L:10D (light:dark) 조건의 배양기(MTI-1100; EYELA, Tokyo, Japan)에서 정치배양(stock culture)하였다. 이후 각포자낭이 형성되지 않은 사상체만을 선별하여 실험에 사용하였다.

사상체 세절 및 배양조건

사상체의 세절은 Heo (2022)의 방법을 참고하여 수행하였다. 유리사상체 0.1 g (wet weight)과 멸균해수 50 mL를 블렌더에 넣고, 각 절편의 길이가 평균 450 μm 가 되도록 세절하였다. 세절한 사상체를 12-well plate에 well 당 약 5~7개가 포함되도록 하였다.

실험은 수온 10, 15, 20, 25, 30°C ($\pm 0.1^\circ\text{C}$), 조도 0, 20, 100

$\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 영양염(PES 첨가 여부)의 세 가지 요인을 조합하여 수행하였다. '영양염 첨가군'은 PES 배지를 20 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 농도로 첨가하였고, '영양염 무첨가군'은 인공해수 염만을 사용하여 영양염이 완전히 결핍된 조건으로 설정하였다. 0 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 는 알루미늄 호일로 차광하여 암조건을 구현하였다. 모든 실험은 14L:10D 조건 하에 수행하였으며, 각 조건은 3개의 반복구로 구성하였다. 반복구 1개당 12 well-plate를 2개를 사용하였다. Well 당 배양액은 3 mL로 유지하였으며, 10일 간격으로 전량 교환하였다. 규조류의 오염을 방지하기 위해 GeO_2 를 추가하였다.

생장 및 성숙 관찰

사상체의 성장 및 성숙 여부는 도립현미경(CKX53; Olympus, Tokyo, Japan)을 이용하여 관찰하였다. 사상체의 생장은 각 처리구마다 10일 간격으로 무작위로 선택된 30개체의 길이를 ImageJ 프로그램(NIH, Bethesda, MD, USA)을 활용하여 측정하였으며, 동일 개체에서 각포자낭의 형성 여부를 확인하였다. 또한 군체(colony)를 형성한 경우에는 해부현미경(SZ51; Olympus)을 사용하여 추가로 관찰하였다. 실험 종료 후, 최종 사멸 여부를 판단하기 위해 모든 사상체를 20°C, 20 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 광주기 14L:10D 조건에서 10일간 추가 배양하였고, 이 기간 동안 회복되지 않은 개체는 사멸로 간주하였다.

통계분석

수온, 조도, 영양염 조건이 각 종의 사상체 성장에 미치는 영향을 분석하기 위해 R ver. 4.5.0을 사용하였다. 등분산성은 Levene's test로 확인하였고, 주요 요인 및 상호작용 효과 분석을 위해 Three-way ANOVA를 실시하였다. 유의차가 있는 경우, Tukey's HSD 검정을 통해 사후분석을 수행하였다.

결 과

수온, 조도, 영양염 조건은 방사무늬김과 잇바디돌김의 사상체 성장에 모두 유의한 영향을 미쳤다. 세 요인 간 상호작용 또한 통계적으로 유의하였으며, 두 종은 조건에 따라 상이한 성장 반응을 보였다($P < 0.001$, Table 1). 방사무늬김 사상체는 15°C의 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 최대($2,967 \pm 64 \mu\text{m}$, mean $\pm$ se)로 성장하였고(Fig. 1A), 잇바디돌김은 25°C의 20 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 최대로 성장하였다($2,623 \pm 262.2 \mu\text{m}$, Fig. 1B). 방사무늬김 사상체의 경우 15°C, 20°C에서 최적 성장을 보였고, 10°C, 25°C에서 생장이 저조하였다. 반면 잇바디돌김 사상체는 10~25°C까지 수온이 상승할수록 생장이 지속적으로 증가하는 경향을 보였다(Table 1). 30°C의 고온에서는 영양염이 첨가된 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 조건에서 각포자낭을 형성한 잇바디돌김 사상체만이 생존하였으며 그 외의 실험구에서는 사상체들이 모두 사멸하였다(Fig. 2m, 2n, 2o, Fig. 3m, 3n, 3o).

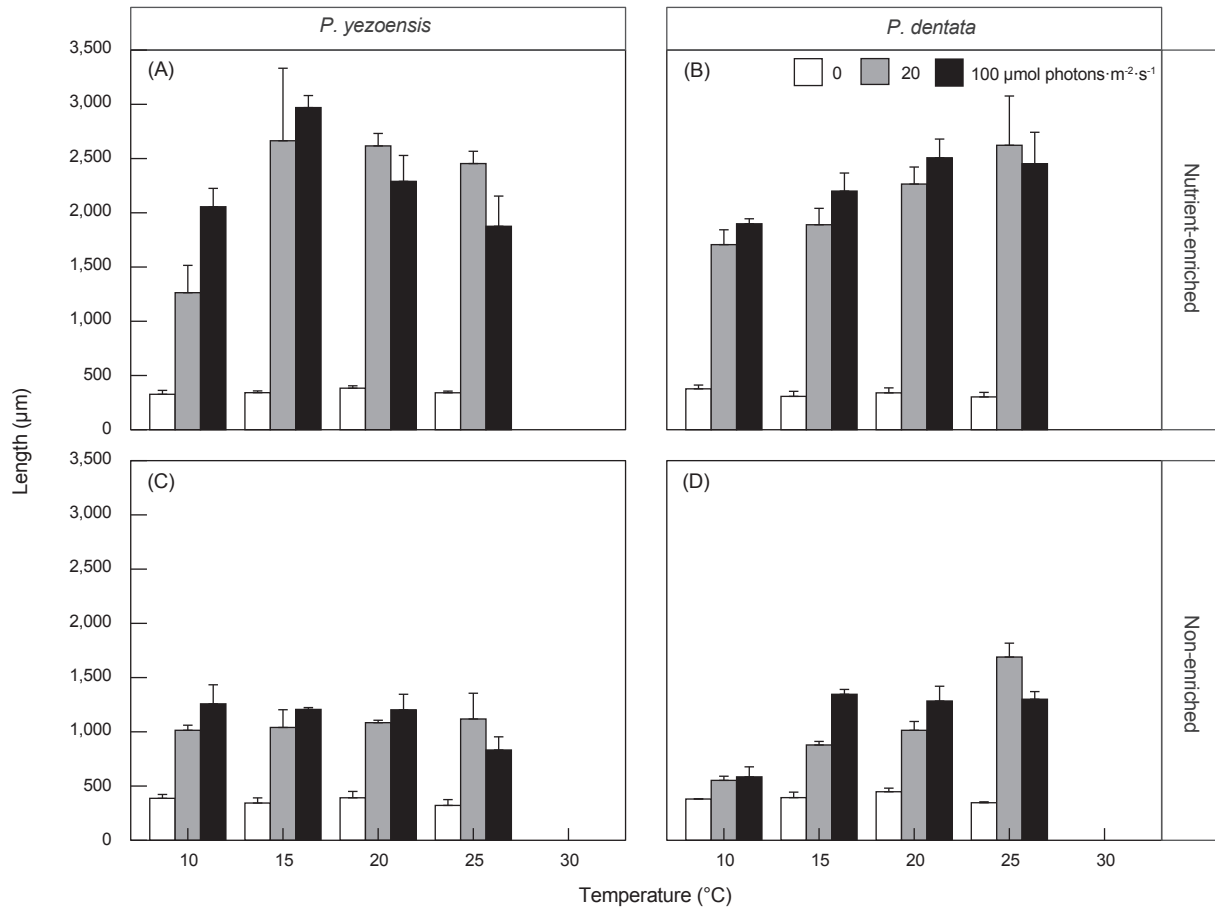


Fig. 1. Conchocelis length (μm) of *Pyropia yezoensis* and *P. dentata* after 80 days of culture under different temperature (10, 15, 20, 25 and 30°C), irradiance (0, 20 and 100 μmol photons·m⁻²·s⁻¹), and nutrient (Nutrient enriched, Non-enriched) conditions. Bar heights represent the mean conchocelis length for each treatment, with error bars indicating standard deviation (n=3). Each panel shows the results for one nutrient condition and species.

Table 1. Three-way ANOVA and Tukey's test for the effects of temperature, irradiance and nutrient on the growth of conchocelis of *Pyropia yezoensis* and *P. dentata*

	<i>P. yezoensis</i>			<i>P. dentata</i>		
	df	F-value	P-value	df	F-value	P-value
Temperature	4	114.887	<0.001	4	223.343	<0.001
Irradiance	2	390.959	<0.001	2	652.068	<0.001
Nutrient	1	311.023	<0.001	1	440.713	<0.001
Temperature×Irradiance	8	32.385	<0.001	8	56.418	<0.001
Temperature×Nutrient	4	28.656	<0.001	4	36.082	<0.001
Irradiance×Nutrient	2	78.078	<0.001	2	138.388	<0.001
Temperature×Irradiance×Nutrient	8	9.287	<0.001	8	8.690	<0.001
Tukey's test (P=0.05)						
Temperature		15=20>25=10>30			25>20>15>10>30	
Irradiance		100=20>0			100>20>0	
Nutrient		O>X			O>X	

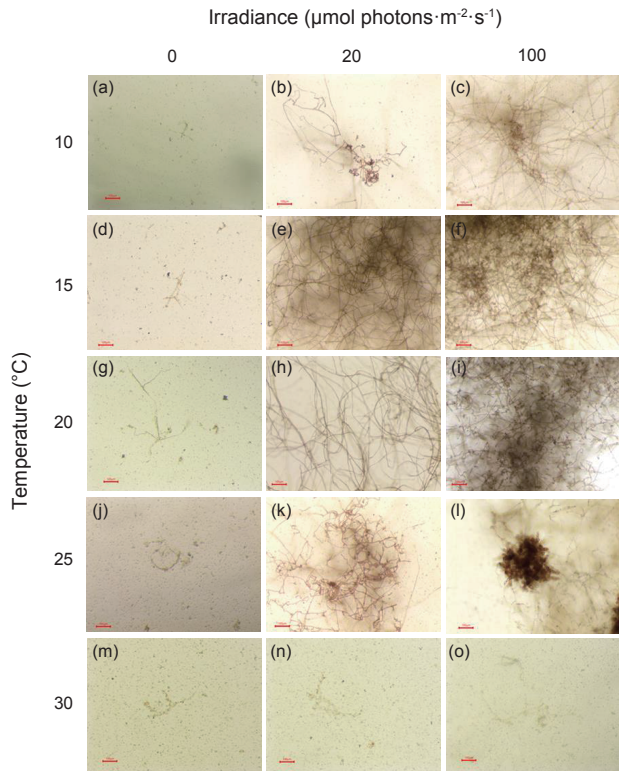


Fig. 2. *Pyropia yezoensis* conchocelis after 80 days of culture under different temperature and irradiance conditions in nutrient-enriched seawater. Images are arranged by columns (irradiance: 0, 20 and 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and rows (temperature: 10, 15, 20, 25 and 30°C). Scale bar=100 μm .

조도 또한 사상체 성장에 유의한 영향을 미쳤다($P<0.001$, Table 1). 두 종의 사상체 모두 0 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 암조건에서는 생장이 정지하였으며, 색소체의 탈색 현상이 관찰되었다(Table 1, Fig. 2, Fig. 3). 실험 종료 후 암조건에서 배양하였던 사상체를 20°C, 20 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 실험구에서 10일간 회복시켰을 때 색소체가 회복되고 생장을 재개한 것을 확인하였다. 이때 10°C의 암조건에서 배양하였던 사상체들은 15–25°C의 암조건에서 배양하였던 사상체들보다 1.5배 느리게 성장하였다(data not shown).

영양염의 첨가 유무도 사상체 성장에 유의한 영향을 미쳤으며($P<0.001$, Table 1), 두 종 모두 영양염을 첨가한 실험구의 사상체 길이는 무첨가 실험구보다 약 2배 길어 영양염 결핍 조건에서 사상체 생장이 저해된 것을 확인하였다(Fig. 1). 또한 영양염 첨가 실험구에서는 두 종 모두 40일차부터 군체를 형성하였으나, 무첨가 실험구에서는 군체를 형성하지 않았고, 색소체의 탈색으로 세포 구조를 명확하게 확인할 수 없었다(Fig. 4).

방사무늬김 사상체는 영양염이 첨가된 20°C, 25°C 조건에서 공통적으로 40일차에 각포자낭 형성이 처음 관찰되었으며

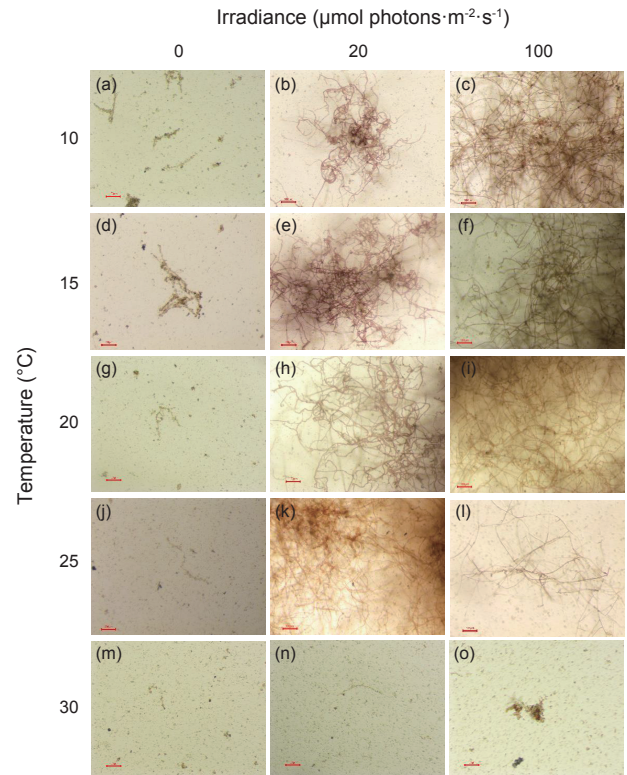


Fig. 3. *Pyropia dentata* conchocelis after 80 days of culture under different temperature and irradiance conditions in nutrient-enriched seawater. Images are arranged by columns (irradiance: 0, 20 and 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and rows (temperature: 10, 15, 20, 25 and 30°C). Scale bar=100 μm .

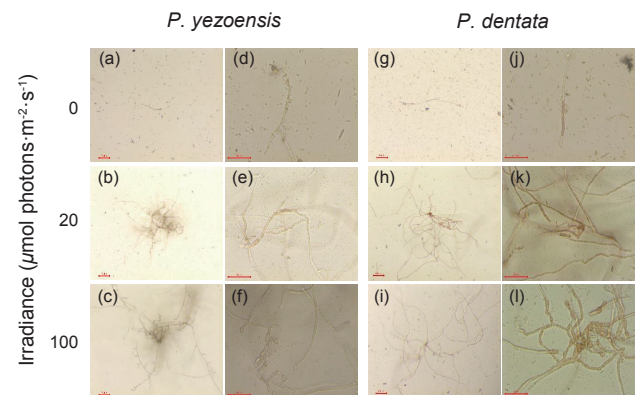


Fig. 4. Conchocelis of *Pyropia yezoensis* and *P. dentata* cultured for 80 days under different levels of irradiance in non-enriched seawater. a–f, *P. yezoensis* cultured at 15°C under 0 (a, d), 20 (b, e), and 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (c, f); g–l, *P. dentata* cultured at 25°C under 0 (g, j), 20 (h, k), and 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (i, l). Scale bars: 100 μm in (a–c, g–i); 50 μm in (d–f, j–l).

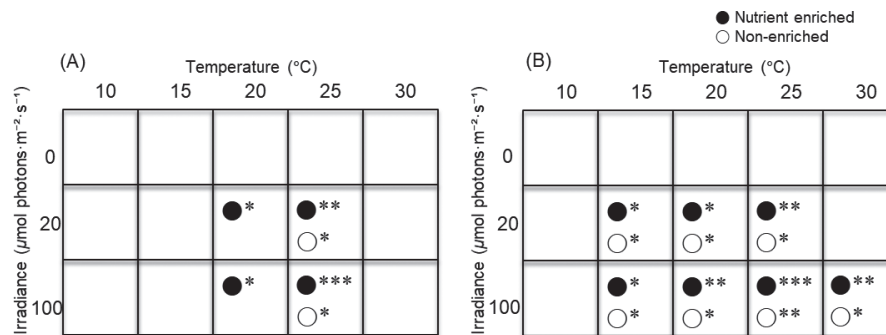


Fig. 5. Conchosporangium formation of (A) *Pyropia yezoensis* and (B) *P. dentata* conchocelis after 80 days of culture under various temperature (10, 15, 20, 25 and 30 °C) and irradiance (0, 20 and 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) conditions in nutrient enriched (●) and non-enriched (○) seawater. All cultures were maintained under a 14L:10D photoperiod. The symbols indicate the formation rate of Conchosporangium as follows: *, 5–10%; **, 10–30%; ***, 30–50%.

(Table 2), 이후 점차 증가하여 80일차에는 25°C, 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 실험구에서 각포자낭 형성률이 50%로 가장 높게 나타났다(Fig. 5A). 영양염을 첨가한 실험구에서는 조도에 따라 각포자낭 형성률의 차이가 나타났으며, 실험 종료 시점 기준 고조도(100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 조건에서 저조도(20 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)보다 높은 각포자낭 형성률을 보였다(Fig. 5). 반면 영양염을 첨가하지 않은 실험구에서는 성숙이 지연되었으며, 25°C, 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 50일차, 20 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 70일차에 각포자낭 형성이 처음 관찰되었다(Table 2). 암조건(0 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)에서는 실험 종료 시점까지 사상체가 성숙하지 않았다(Fig. 6a, 6d).

잇바디돌김 사상체는 10°C를 제외한 모든 수온에서 성숙이 관찰되었다(Fig. 5B). 20°C, 25°C 조건에서 영양염 첨가 실험구에서는 30일차에, 무첨가 실험구에서는 40일차에 각포자낭 형성이 시작되었다(Table 2). 실험 종료 시점 기준 25°C, 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 조건에서 각포자낭 형성률이 30–50%로 가장 높았고, 15°C, 20°C, 30°C에서는 모두 성숙률이 30% 이하로 낮았다(Fig. 5B). 특히, 30°C에서 성숙하지 않은 사상체는

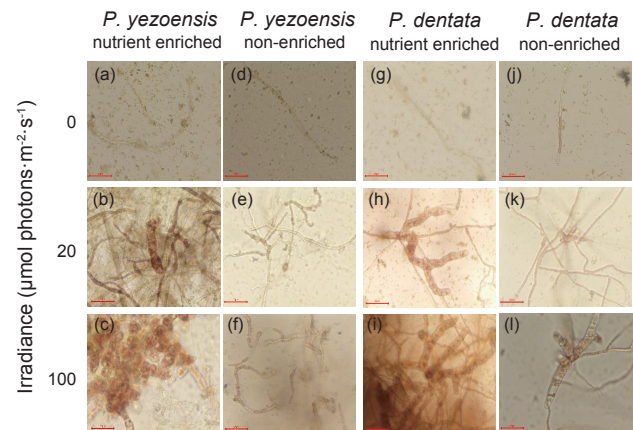


Fig. 6. Conchosporangium formation in *Pyropia yezoensis* and *P. dentata* after 80 days of culture under different irradiances (0, 20 and 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and nutrient conditions. *P. yezoensis* cultured in nutrient enriched (a–c) and non-enriched seawater (d–f); *P. dentata* cultured in nutrient enriched (g–i) and non-enriched seawater (j–l). All samples were maintained at 25°C under a 14L:10D photoperiod. Scale bars=50 μm .

Table 2. Time course of conchosporangium formation in *Pyropia yezoensis* and *P. dentata* conchocelis cultured under different nutrient (N), irradiance (I, $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), and temperature (10–30°C) conditions

<i>P. yezoensis</i>							<i>P. dentata</i>						
N	I	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	N	I	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
	0	-	-	-	-	-		0	-	-	-	-	-
O	20	-	-	Day 40	Day 40	-	O	20	-	Day 50	Day 30	Day 30	-
	100	-	-	Day 40	Day 40	-		100	-	Day 50	Day 30	Day 30	Day 60
	0	-	-	-	-	-		0	-	-	-	-	-
X	20	-	-	-	Day 70	-	X	20	-	Day 70	Day 40	Day 40	-
	100	-	-	-	Day 50	-		100	-	Day 70	Day 40	Day 40	Day 70

O and X indicate the presence or absence of nutrient enrichment, respectively. Numbers represent the initial day of conchosporangium observation for each condition.

모두 사멸한 반면, 각포자낭을 형성한 사상체는 80일차에도 생존한 것을 확인하였다. 암조건 실험구에서는 방사무늬김 사상체와 동일하게 성숙이 관찰되지 않았다(Fig. 6g, 6j).

고 찰

본 연구에서는 수온(10–30°C), 조도(0, 20, 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 영양염(첨가, 무첨가)의 상호작용이 방사무늬김과 잇바디돌김 사상체의 생장 및 성숙에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 두 종의 사상체 생장에 적합한 수온을 살펴보면, 방사무늬김은 15°C, 잇바디돌김은 25°C에서 각각 최대 생장하였다. 이는 Kang (2017)이 제시한 방사무늬김 사상체의 최적 생장 수온(15–20°C)과 일치하며, 잇바디돌김 사상체의 25°C 생장 최적 조건 역시 Notoya et al. (1993), Zhong et al. (2016)의 보고와 부합한다. Heo (2022)의 연구에서는 방사무늬김과 잇바디돌김의 패각사상체(shell-living conchocelis)가 30°C에서 21일간 생존한 것으로 보고된 바 있으나, 본 연구에서는 유리사상체(free-living conchocelis)를 80일동안 30°C 조건에서 배양하였을 때 두 종 모두 사멸하였다. 이는 동일한 수온 조건에서도 사상체의 부착기질의 유무 및 특성, 배양 기간에 따라 생존율이 달라질 수 있음을 시사한다. 본 실험에서는 사상체의 사멸 여부를 실험 종료 시점(80일)에 판별하였기 때문에 실제 사멸 시점은 더 이른 시기였을 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 고온 조건에서의 정확한 생존 기간을 구명하기 위해서는 사멸 시점을 확인하는 후속 연구가 필요하다. 특히, 최근 이상기후로 인해 30°C 이상의 고수온 발생 빈도와 지속 시간이 증가하고 있는 만큼 향후 김숙 해조류의 지속 가능한 양식과 보전을 위해 고온 내성에 대한 평가가 필수적임을 시사한다.

암조건에서 사상체는 생장을 정지하였으나, 조도(20 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)와 수온(20°C)이 회복되면 광합성 색소가 다시 축적되고 생장이 재개되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 사상체가 암조건에서도 일정 기간 생존 가능하며, 환경 조건이 호전되면 생리적 회복 기작이 활성화될 수 있음을 시사한다. 그러나 암조건과 고수온이 복합적으로 작용한 0 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 30°C 조건에서는 사상체가 회복되지 못하고 사멸하였다(data not shown). 이는 두 극한 요인이 복합적으로 작용할 경우, 사상체의 생리적 회복 능력이 상실된다는 것을 보여주는 결과이다. 다만 본 실험은 주기적인 환수 과정에서 미량의 광 유입이 불가피하여, 완전한 암조건이 구현되지 못한 한계가 존재한다. 향후에는 완전한 암조건을 구현할 수 있는 다양한 실험적 접근을 통해, 극한 환경에서의 사상체 생존과 회복 가능성을 보다 정밀하게 구명할 필요가 있다.

영양염 첨가 여부에 따른 사상체 생장을 비교한 결과, 영양염 첨가 실험구가 무첨가 실험구에 비해 약 2배 이상 높은 생장을 보였다. 방사무늬김의 경우, 영양염 첨가 실험구에서는 평균 1,500 μm 이상의 생장을 보인 반면, 무첨가 실험구에서는 약 600 μm 수준에 그쳐 영양염 결핍이 사상체의 생장을 제한하는

주요 요인임을 확인하였다. 이는 본 연구의 가설 중 하나인 ‘영양염 결핍 조건에서는 사상체의 생장이 저해되며, 성숙하지 않을 것이다’를 일부 지지하는 결과이다. Lin and Stekol (2013)의 연구에서도 영양염 무첨가 실험구에서 알래스카산 김 4종 사상체의 엽록소 *a* 함량이 유의하게 낮았으며, 특히 *P. abbottae*, *P. pseudolanceolata*, *P. pseudolinearis*의 경우, 배양기간이 길어질수록 색소 함량이 지속적으로 감소한다고 보고하였다. 이러한 결과는 영양염 결핍이 광합성 색소의 합성을 억제하고 생리적 활성을 저해함으로써 사상체의 생장에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 다만, 본 연구에서 광이 존재하는 조건에서의 영양염 무첨가 실험구의 사상체는 사멸하지 않고 제한적인 생장을 지속하는 것으로 나타났으며, 이는 영양염 결핍 조건에서도 광합성을 통한 자가영양으로 최소한의 생존이 가능함을 보여주는 결과로 해석된다.

방사무늬김 사상체는 20–25°C에서, 잇바디돌김 사상체는 10°C를 제외한 모든 수온에서 각포자낭을 형성하였다. 방사무늬김 사상체가 20–25°C에서 성숙한 결과는 Li et al. (2010)의 보고와 일치하며, 잇바디돌김 사상체가 10°C를 제외하고 성숙한 것은 Kim (1999)이 수온이 상승할수록 각포자낭 형성률이 유의하게 증가한다고 보고한 결과와 유사하다. 본 연구에서 0 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 암조건에서는 두 종 모두 각포자낭이 형성되지 않았으며, 100 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 고조도 조건에서 각포자낭 형성률이 높게 나타났다. 이러한 결과는 Heo (2022)의 연구에서 방사무늬김 패각사상체를 1, 5 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 저조도에서 4주간 배양했을 때, 각포자낭이 형성되지 않았다는 결과와 유사하다. 이는 사상체의 성숙을 위해서는 일정 수준 이상의 광량이 필수적이며, 빠른 성숙 유도를 위해서는 고조도 환경이 보다 효과적일 수 있음을 시사한다. 그러나 Terada et al. (2020)은 큰방사무늬김(*P. yezoensis* f. *narawaensis*) 사상체를 1,000 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에 6시간 노출시켰을 때 광화학 효율(ΦPSII)이 저하되었고, 이후 생장에 적합한 조건에서도 Fv/Fm (maximum quantum yield of photosystem II) 회복이 일어나지 않았다고 보고하였다. 따라서 고조도가 사상체의 성숙에 반드시 유리하다고 단정할 수는 없으므로 배양 기간과 조도·광주기를 함께 고려한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 영양염 결핍은 사상체 생장에는 부정적인 영향을 미쳤으나, 사상체의 성숙은 특정 수온과 조도에서 제한적으로 이루어질 수 있음을 확인하였다. 이는 사상체의 성숙이 반드시 생장과 비례하지 않으며, 수온과 광조건이 일정 수준 이상 확보되면 영양염이 결핍된 상태에서도 각포자낭 형성이 가능함을 나타낸다. 향후에는 해양 환경에서 지속적으로 감소하고 있는 질산염 및 인산염 농도(Park et al., 2023)를 고려하여 영양염 농도에 따른 사상체의 생장 및 성숙에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 필요가 있을 것으로 보인다.

본 연구는 고수온, 암조건, 영양염 결핍 등 다양한 환경 스트레스 조건에서 방사무늬김과 잇바디돌김 사상체의 생장 및 성

속에 미치는 영향을 분석하였다. 영양염 무첨가군의 사상체 생장은 영양염 첨가군에 비해 저해되었다. 사상체의 성숙은 영양염 무첨가군에서 영양염 첨가 처리군에 비해 각포자낭 형성률은 낮았으나, 각포자낭 형성 자체는 가능함을 확인하였다. 따라서 가설 (1) ‘영양염 결핍 조건에서는 사상체의 생장이 저해되며 성숙하지 않을 것이다’는 부분적으로 기각되었다. 또한 암조건에서는 사상체의 사멸이 아닌 생장의 정지가 관찰되었고, 30°C의 고수온 조건에서는 두 종의 사상체 모두 사멸하였다. 특히 암조건과 고수온이 복합적으로 작용한 실험구에서도 사멸하였으므로, 가설 (2) ‘암조건과 고수온 환경에서는 사상체가 사멸할 것이다’를 지지하는 결과를 나타냈다. 본 연구 결과는 김속의 현미경적 생활사 단계인 사상체의 성장 및 성숙이 수온, 조도, 영양염의 복합적인 상호작용에 의해 조절됨을 시사한다. 또한 30°C를 제외한 수온 조건에서는 암조건에서도 일정 기간 생존이 가능하며, 이후 호조건에서 회복한 것을 확인하였다. 이는 최근 급변하는 해양 환경에 대한 김속 사상체의 생리적 반응을 이해하는 데 중요한 기초자료로 활용될 수 있다. 특히 패각배양장은 고온이나 저조도 등 극한 환경에 노출될 가능성이 높다는 점에서, 본 연구는 김 양식의 지속 가능성 확보를 위한 효과적인 종자 생산 체계 구축과 자연 개체군 보전 전략 수립에 기여할 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

References

- Amano H and Noda H. 1987. Effect of nitrogenous fertilization on the recovery of discolored fronds of *Porphyra yezoensis*. Bot Mar 30, 467-473.
- Cui J, Zhang J, Huo Y, Zhou L, Wu Q, Chen L, Yu K and He P. 2015. Adaptability of free-floating green tide algae in the Yellow Sea to variable temperature and irradiance. Mar Pollut Bull 101, 660-666. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.033>.
- He P and Yarish C. 2006. The developmental regulation of mass cultures of free-living conchocelis for commercial net seeding of *Porphyra leucosticta* from Northeast America. Aquaculture 257, 373-381. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.017>.
- Heo JS. 2022. Studies on the growth and maturation of shell-living conchocelis for seed production of three *Pyropia* species in Korea. Ph. D. Thesis, Wonkwang University, Iksan, Korea.
- Kang SG. 2017. The influence of temperature, pH and light intensity on growth and maturation of the conchocelis phase of *Pyropia yezoensis*. Ph. M. Thesis, Soonchunhyang University, Asan, Korea.
- Kim BT, Brown CL and Kim DH. 2019. Assessment on the vulnerability of Korean aquaculture to climate change. Mar Policy 99, 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.10.009>.
- Kim JB, Lee WC, Hong SJ, Shim JH, Park JI, Park JH and Lee EG. 2012. Relationship between environmental characteristics and pigment composition and concentrations of *Porphyra yezoensis* Ueda in the southwestern coast of the Korean Peninsula. Korean J Environ Biol 30, 200-209.
- Kim NG and Notoya M. 2004. Life history of *Porphyra seriata* Kjellman (Bangiales, Rhodophyta) from Korea in laboratory culture. Algae 19, 303-309. <https://doi.org/10.4490/AL-GAE.2004.19.4.303>.
- Kim NG. 1999. Culture studies of *Porphyra dentata* and *P. pseudolinearis* (Bangiales, Rhodophyta), two dioecious species from Korea. In: Sixteenth International Seaweed Symposium. Kain JM, Brown MT and Lahaye M, eds. Developments in Hydrobiology, vol 137. Springer, Dordrecht, Netherlands, 127-135. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4449-0_15.
- Le B, Nadeem M, Yang SH, Shin JA, Kang MG, Chung G and Sun S. 2018. Effect of silicon in *Pyropia yezoensis* under temperature and irradiance stresses through antioxidant gene expression. J Appl Phycol 31, 1297-1302. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1605-0>.
- Lee SY, Kim YH, Kim SH and Yoo HI. 2019. A study on the recovery of discoloration of *Pyropia yezoensis* in laboratory culture. Korean J Environ Biol 37, 719-728. <https://doi.org/10.11626/kjeb.2019.37.4.719>.
- Li X, Yang L, He P. 2010. Formation and growth of free-living conchosporengia of *Porphyra yezoensis*: Effects of photoperiod, temperature and irradiance. Aquac Res 42, 1079-1086. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02691.x>.
- Lin R and Stekol MS. 2013. Responses of chlorophyll a content for conchocelis phase of Alaskan *Porphyra* (Bangiales, Rhodophyta) species to environmental factors. Adv Biosci Bioeng 1, 28-39. <https://doi.org/10.11648/j.abb.20130101.14>.
- Ma J, Xu T, Bao M, Zhou H, Zhang T, Li Z, Gao G, Li X and Xu J. 2020. Response of the red algae *Pyropia yezoensis* grown at different irradiances to CO₂-induced seawater acidification at different life cycle stages. Algal Res 49, 101950. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101950>.
- MABIK (National Marine biodiversity Institute of Korea). 2025. Taxonomic Information of *Pyropia* Spp. Retrieved from <https://www.mbris.re.kr> on Jun 20, 2025.
- MOF (Ministry of Ocean and Fisheries). 2024. Fisheries Information Portal. Retrieved from <https://www.fips.go.kr/p/Main/> on Jun 20, 2025.
- Nishikawa T and Yamaguchi M. 2006. Effect of temperature on light-limited growth of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenberg, a causative organism in the discoloration

- of *Porphyra* thalli. Harmful Algae 5, 141-147. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2005.06.007>.
- Notoya M, Kikuchi N, Matsuo M, Aruga Y and Miura A. 1993. Culture studies of four species of *Porphyra* (Rhodophyta) from Japan. Nippon Suisan Gakkaishi 59, 431-436. <https://doi.org/10.2331/suisan.59.49>.
- Park SJ, Kim GB, Kwon HK and Han IS. 2023. Long-term changes in the concentrations of nutrients in the marginal seas (Yellow Sea, East China Sea, and East/Japan Sea) neighboring the Korean Peninsula. Mar Pollut Bull 192, 115012. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115012>.
- Provasoli L. 1968. Media and prospects for the cultivation of marine algae. In: Culture and Collection of Algae. Watanabe H and Hattori A, eds. Proceedings of the US-Japan Conference, Hakone, Japan, 63-75.
- Sakaguchi K, Ochiai N, Park CS, Kakinuma M and Amano H. 2003. Evaluation of discoloration in harvested laver *Porphyra yezoensis* and recovery after treatment with ammonium sulfate enriched seawater. Nippon Suisan Gakkaishi 69, 399-404. <https://doi.org/10.2331/suisan.69.399>.
- Tada K, Fujiwara M and Honjo T. 2010. Water quality nori (*Porphyra*) culture in the Seto Inland Sea. Bunseki Kagaku 59, 945-955. <https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.59.945>.
- Tulandi DA and Tumangkeng JV. 2021. Analysis of daily dynamics of thermal interaction of temperature and ocean flow in seaweed growth areas. J Phys Conf Ser 1968, 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1968/1/012035>.
- Terada R, Yuge T, Watanabe Y, Mine T, Morikawa T and Nishihara GN. 2020. Chronic effects of three different stressors, irradiance, temperature, and desiccation, on the PSII photochemical efficiency in the heteromorphic life-history stages of cultivated *Pyropia yezoensis* f. *narawaensis* (Bangiales) from Japan. J Appl Phycol 32, 3273-3284. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02152-x>.
- Yin J, Lu A, Che T, He L and Shen S. 2022. A preliminary study on the mechanisms of growth and physiological changes in response to different temperatures in *Neopyropia yezoensis* (Rhodophyta). Water 14, 2175. <https://doi.org/10.3390/w14142175>.
- Zhong D, Wang W, Sun X, Liu F, Liang Z, Wang F and Chen W. 2016. Developmental and physiological properties of *Pyropia dentata* (Bangiales, Rhodophyta) conchocelis in culture. J Appl Phycol 28, 3435-3445. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0877-5>.
- Zhong X, Che S, Xie C, Wu L, Zhang X, Tian L, Liu C, Li H and Du G. 2023. Physiological response of red macroalgae *Pyropia yezoensis* (Bangiales, Rhodophyta) to light quality: A short-term adaptation. Algae 38, 141-150. <https://doi.org/10.4490/algae.2023.38.5.25>.