

국내 연안 미세조류 4개 분리주의 배양 특성과 참굴(*Crassostrea gigas*) 유생 먹이생물 적합성 평가

이상백^{1,2} · 박정은¹ · 천민우¹ · 김강래¹ · 박수진¹ · 이덕찬¹ · 정귀택² · 김소희^{1,2*}

¹국립수산과학원 남동해수산연구소, ²국립부경대학교 생물공학과

Culture Characteristics and Feed Suitability of Four Korean Coastal Microalgal Isolates for *Crassostrea gigas* Larvae

Sang Baek Lee^{1,2}, Jeoung Eun Park¹, Min Woo Cheon¹, Kang-Rae Kim¹, Su-Jin Park¹, Deok-Chan Lee¹, Gwi-Taek Jeong² and So Hee Kim^{1,2*}

¹Southeast Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science (NIFS), Tongyeong 53085, Republic of Korea

²Department of Biotechnology, School of Marine, Fisheries and Life Science, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

Four microalgal isolates from Korean oyster farming areas were evaluated for their culture characteristics and suitability for Pacific oyster *Crassostrea gigas* larvae. Molecular analyses identified the isolates as *Dunaliella bioculata* (SA; Sinan-gun, Jeollanam-do), *Picochlorum* aff. *costavermella* (WD; Wando-gun, Jeollanam-do), *Porphyridium* aff. *purpureum* (GH; Goheung-gun, Jeollanam-do), and *Tetraselmis chuii* (TY; Tongyeong-si, Gyeongsangnam-do). Responses to salinity (0–40 psu) and temperature (10–30°C) were assessed after 8 days of cultivation. All isolates grew in 2 m³ paddlewheel-driven raceway tanks, reaching day 7 cell densities of $31.7 \pm 2.1 \times 10^4$, $2,173.3 \pm 30.6 \times 10^4$, $60.0 \pm 1.0 \times 10^4$, and $47.0 \pm 2.0 \times 10^4$ cells/mL for SA, WD, GH, and TY, respectively. The specific growth rates during exponential growth were 0.412, 0.838, 0.908, and 0.545 d⁻¹, respectively. Larval ingestion was evaluated 2 h post-feeding across four developmental stages: D-shaped, early umbo, middle umbo, and late umbo. WD showed ingestion rates above 90% across all stages. SA was ingested from the D-shaped stage onward, whereas GH and TY showed limited ingestion during the early stages, but were ingested by all late umbo larvae. These results demonstrated isolate-specific culture characteristics and stage-dependent ingestion. However, long-term feeding trials are required to evaluate larval growth, survival, metamorphosis, and settlement and to confirm the suitability of these isolates for hatchery applications.

Keywords: Microalgal isolates, Feed organism, Mass cultivation, Pacific oyster larvae, Ingestion rate

서론

해양 미세조류는 광합성 미생물로서 수중생태계의 기초생산자이다(Falkowski et al., 1998). 이들은 단백질, 지질, 탄수화물, 색소 및 생리활성물질을 생산하므로 식품·사료 원료와 바이오 소재 등 다양한 분야에 활용된다(Spoladore et al., 2006; Barra et al., 2014). 수산양식 분야에서 미세조류는 패류, 갑각류 및 어류 자·치어의 먹이생물로 이용되며, 패류 부유유생의

주요 먹이원으로 공급된다(Lavens and Sorgeloos, 1996; Helm et al., 2004).

참굴(*Crassostrea gigas*)은 국내 패류양식의 주요 대상으로, 2025년 국내 굴류 양식 생산량은 301,638 t으로 집계되었다(KOSIS, 2026). 그러나 2017년 연간생산량 30만 t을 상회한 이후 생산량 증가가 이루어지지 못하고 있으므로, 양식 생산을 안정적으로 유지하기 위해서는 양질의 종자를 지속적으로 확보하는 것이 중요하다. 또한, 수온, 염분 및 산성화 등 굴 양식환경

*Corresponding author: Tel: +82. 55. 860. 7703 Fax: +82. 55. 863. 3777

E-mail address: thgm1327@korea.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.2026.0285>

Korean J Fish Aquat Sci 59(4), 285-298, August 2026

Received 28 May 2026; Revised 7 July 2026; Accepted 23 July 2026

저자 직위: 이상백(연구원), 박정은(연구원), 천민우(연구원), 김강래(연구사), 박수진(연구사), 이덕찬(연구관), 정귀택(교수), 김소희(연구사)

변화에 따라 유생의 생산과 초기 생활사에 영향(Neokye et al., 2024)을 줄 수 있으므로, 자연채묘의 변동성을 보완하고 필요한 종자를 계획적으로 공급하기 위해서는 보다 안정적인 인공 종자 생산 기반이 필요하다.

미세조류는 다양한 패류의 먹이생물로 이용되지만, 모든 미세조류가 참굴 유생의 발달단계에서 동일하게 섭취되는 것은 아니다. 미세조류의 생화학적 조성 및 영양가는 종에 따라 다르며 (Brown et al., 1997), 참굴 유생이 섭취할 수 있는 미세조류의 크기와 종류도 발달단계에 따라 달라진다(Hur et al., 2011). 패류용 먹이생물로 이용되는 미세조류라 하더라도 참굴 유생에 대한 발달단계별 섭취 반응을 직접 평가할 필요가 있다. 미세조류의 증식은 온도, 염분 및 광 조건의 영향을 받으며(Chen et al., 2012; Hotos and Avramidou, 2021; Haris et al., 2022), 대량배양에는 배양시설, 해수처리, 영양염, 에너지 및 인력이 필요하다(Lavens and Sorgeloos, 1996; Helm et al., 2004). 따라서 참굴 유생의 먹이생물 후보를 선발하려면 세포의 물리적 특성과 발달단계별 섭취 반응뿐만 아니라 배양조건에 따른 증식 특성과 대량배양에서의 세포밀도 변화도 함께 평가해야 한다.

패류양식해역에서 분리한 지역 유래 미세조류는 기존 먹이생물을 보완할 수 있는 잠재적 자원이다. 본 연구에서는 패류종자 생산 현장에서의 이용을 고려하여, 양식이 이루어지는 연안을 미세조류 채집지역으로 선정하여 분리·선발하고, 선발된 분리주의 분류학적 위치와 염분 및 온도에 따른 배양 특성을 조사하였다. 또한, 대량배양에서의 세포밀도 변화와 참굴 유생의 발달 단계별 섭취 반응을 평가하였다. 이를 통해 국내 연안 유래 미세조류의 배양 및 이용 특성을 파악하고, 참굴 인공종자 생산용 먹이생물 후보 선발을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

미세조류 분리주 확보

대상 미세조류는 경상남도 통영시(Tongyeong, TY)와 전라남도 고흥군(Goheung, GH), 신안군(Sinan, SA) 및 완도군(Wan-

do, WD) 연안의 표층 해수에서 채집하였다. 각 분리주의 채집 일과 채집 지점은 Table 1과 같다. 채집 지점의 수온, 염분 및 pH는 다항목 수질측정기(YSI 650 MDS with 600XLM probe; YSI Incorporated, Yellow Springs, OH, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 채집한 해수는 망목 10 μm 의 플랑크톤 네트를 이용하여 농축하였다.

실험실로 운반한 시료는 광학현미경(CX31; Olympus Corporation, Tokyo, Japan)으로 미세조류의 존재 여부와 형태적 특성을 관찰하였다. 미세조류를 분리하기 위해 F/2 배지(G0154; Sigma-Aldrich Corp., St. Louis, MO, USA)와 F/2-Si 배지(G9903; Sigma-Aldrich)에 각각 0.8% (w/v)의 한천을 첨가하여 평판배지로 제작하였다. 농축 시료를 평판배지에 접종하여 균일하게 도말한 후 20°C, 광도 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 및 광주기 12:12 h (light:dark) 조건에서 2-4주간 배양하였다.

배양 후 형성된 집락은 색, 크기, 윤곽 및 표면 형태로 구분하여 선별하였다. 선별한 집락은 광학현미경으로 세포의 크기와 형태를 관찰하고, 다른 미세조류의 혼입 여부를 확인하였다. 다른 미세조류가 관찰되지 않을 때까지 각 집락을 새로운 평판배지에 반복적으로 재도말하여 단일조류 배양체를 확보하였다. 확보한 단일조류 배양체는 F/2 또는 F/2-Si 액체배지 5 mL가 담긴 6-well plate로 옮겨 배양하였다. 세포 증식이 확인된 배양체는 10 mL와 100 mL로 단계적으로 확대하였다. 액체 계대 배양은 평판배양과 동일한 20°C, 광도 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 및 광주기 12:12 h (light:dark) 조건에서 수행하였다. 계대배양 과정에서 지속적인 증식이 확인된 4개 분리주를 최종 실험대상으로 선정하였다.

분자생물학적 종 동정

확보된 미세조류 분리주는 분자생물학적 분석으로 종 동정하였다. 분석에 사용된 genomic deoxyribonucleic acid (DNA)는 각 분리주의 지수성장기 배양액 10 mL를 수확하여 8,000 $\times g$ 에서 3 min간 원심분리한 후, 상등액을 제거하고 회수한 세포 펠렛으로부터 DNeasy PowerSoil Pro Kit (QIAGEN GmbH,

Table 1. Sampling locations and environmental conditions at four Korean coastal sites used for microalgal isolation

Isolate	Location	Geographic coordinates	Collection date	Water temperature (°C)	Salinity (psu)	pH
SA	Sinan-gun, Jeollanam-do	35°03'09.7" N, 126°15'39.2" E	Feb 14, 2024	6.50	31.52	8.42
WD	Wando-gun, Jeollanam-do	34°10'53.3" N, 126°51'22.9" E	May 18, 2024	15.31	33.81	7.87
GH	Goheung-gun, Jeollanam-do	34°27'14.0" N, 127°05'57.0" E	May 18, 2024	16.12	33.70	7.81
TY	Tongyeong-si, Gyeongsangnam-do	34°52'30.6" N, 128°22'21.4" E	Feb 27, 2024	10.00	33.43	7.84

SA, WD, GH, and TY denote isolates collected from Sinan-gun in Jeollanam-do, Wando-gun in Jeollanam-do, Goheung-gun in Jeollanam-do, and Tongyeong-si in Gyeongsangnam-do, respectively.

Hilden, Germany)를 사용하여 제조사의 지침에 따라 추출하였다.

중 동정을 위해 추출한 genomic DNA를 주형으로 large subunit (LSU) D2/D3, internal transcribed spacer (ITS)-LSU D1 및 18S ribosomal DNA (rDNA) 영역을 polymerase chain reaction (PCR)로 증폭하였으며, 반응액은 AccuPower PCR Pre-Mix (Bioneer Corporation, Daejeon, Republic of Korea)를 이용하여 제조사의 방법에 따라 조제하였고, 각 영역의 증폭에 사용한 primer와 PCR 조건은 Table 2와 같다.

증폭된 PCR 산물은 1.0% agarose gel 전기영동을 통해 확인하였으며, 증폭이 확인된 PCR 산물은 Macrogen Inc. (Seoul, Republic of Korea)에 의뢰하여 Sanger sequencing으로 염기서열을 분석하였다. 확보한 염기서열은 National Center for Biotechnology Information (NCBI)의 GenBank database를 대상으로 basic local alignment search tool (BLAST) 검색을 수행하였으며, query coverage, sequence identity가 가장 높은 등록 서열을 기준으로 분리주의 분류학적 근연성을 확인하였다.

분리주 염분 및 온도 조건별 배양 특성

분리주 SA (*Dunaliella bioculata*), WD (*Picochlorum* aff. *costavermella*), GH (*Porphyridium* aff. *purpureum*) 및 TY (*Tetraselmis chuii*)를 대상으로 염분과 온도에 따른 배양 특성을 조사하였다. 염분 실험은 0, 10, 20, 30 및 40 psu로 설정하였으며, 배지의 염분은 3차 증류수와 염화나트륨(NaCl; Duksan Pure Chemicals Co., Ltd., Ansan, Republic of Korea)을 이용하여 조절하였다. 염분 실험의 배양온도는 20°C로 설정하였다. 온도 실험은 염분을 30 psu로 고정하고, 배양온도를 10, 15, 20, 25 및 30°C로 설정하였다.

500 mL 삼각플라스크에 배양액 200 mL를 분주하고 고압 멸균기에서 121°C로 15 min간 멸균한 후, 초기 세포밀도가 1×10^5 cells/mL가 되도록 접종하였다. 배양은 광도 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 광주기 12:12 h (light:dark) 및 교반속도 120 rpm 조건

에서 8일간 진탕배양하였다. 모든 실험은 3반복으로 수행하였다. 세포밀도는 배양 0일차와 8일차에 광학현미경과 혈구계산판(DHC-N01; INCYTO Co., Ltd., Cheonan, Republic of Korea)을 이용하여 확인하였다.

분리주 대량배양 평가

4개 분리주별 패류 인공종자 생산 현장에서 대량배양 가능성을 평가하기 위해 자체 제작 수용적 2 m³ 규모(L 3,000×W 1,100×H 800 mm)의 회전수차식 트랙형 수조를 이용하여 배양 실험을 수행하였다(Fig. 1).

배양수는 1 μm 카트리지 필터로 여과한 후, 차아염소산나트륨(7585-1400; Daejung Chemicals & Metals Co., Ltd., Siheung, Republic of Korea)을 300 mL/m³ 농도로 첨가하여 24 h 동안 방치하였다. 이후, 티오황산나트륨 오산화물(000S3851; Samchun Pure Chemical Co., Ltd., Pyeongtaek, Republic of Korea)을 80 g/m³ 농도로 처리하여 잔류염소를 중화하였다(Lavens and Sorgeloos, 1996; Helm et al., 2004). 중화 후 잔류 유리염소 측정기(HI97701; Hanna Instruments Inc., Woonsocket, RI, USA)를 이용하여 잔류염소 존재 여부를 확인한 후 배양에 사용하였다. 배양수는 농업용 복합비료(Eco-sol High N, 25-9-18+EDTA-chelated; FarmHannong Co., Ltd., Seoul, Republic of Korea) 60 g/m³와 비타민 용액 100 mL/m³를 첨가하였다. 비타민 용액은 thiamine HCl 100 mg/L, biotin 0.5 mg/L 및 cyanocobalamin 0.5 mg/L로 조성하였다(Guillard, 1975; Creswell, 2010).

초기 접종은 20 L 투명 용기에서 배양한 각 분리주의 배양액을 최종 배양 부피의 2% (v/v)가 되도록 첨가하였다. 배양은 수온 20°C, 염분 32–34 psu 및 광도 80–150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 조건에서 수행하였으며, 인공광을 24 h 연속 조사하였다. 수차의 회전속도는 6 rpm으로 유지하였으며, 7일간 배양하였다. 배양시료는 24 h 간격으로 채취하였고, 광학현미경과 혈구계산판을 이용하여 세포밀도를 측정하였다. 배양실험은 3회 반복하였다.

분리주별 일간 비성장률(specific growth rate, μ)은 지수성장

Table 2. Primers and PCR conditions used for molecular identification of the microalgal isolates

Marker region	Primers and sequences (5'–3')	Initial denaturation	Cycling conditions	Cycles	Final extension
LSU D2/D3	T16N	94°C, 5 min	94°C, 30 s; 50°C, 30 s; 72°C, 1 min	38	72°C, 8 min
	AMAAGTACCRYGAGGGAAAG				
	T24U				
ITS-LSU D1	SCWCTAATCATTCGCTTTACC	95°C, 3 min	95°C, 30 s; 58°C, 30 s; 72°C, 30 s	34	72°C, 10 min
	ITS1				
	GAAGTCGTAACAAGGTTTCCGTA				
18S rDNA	LSU D1	95°C, 5 min	95°C, 20 s; 55°C, 20 s; 72°C, 2 min	35	72°C, 5 min
	GTATCGCATTTTCGCTGCGTTC				
	NS1				
	GTAATCATATGCTTGTCTC				
	NS8				
	TCCGCAGGTTTCACCTACGGA				

ITS, internal transcribed spacer; LSU, large subunit; PCR, polymerase chain reaction; rDNA, ribosomal DNA.

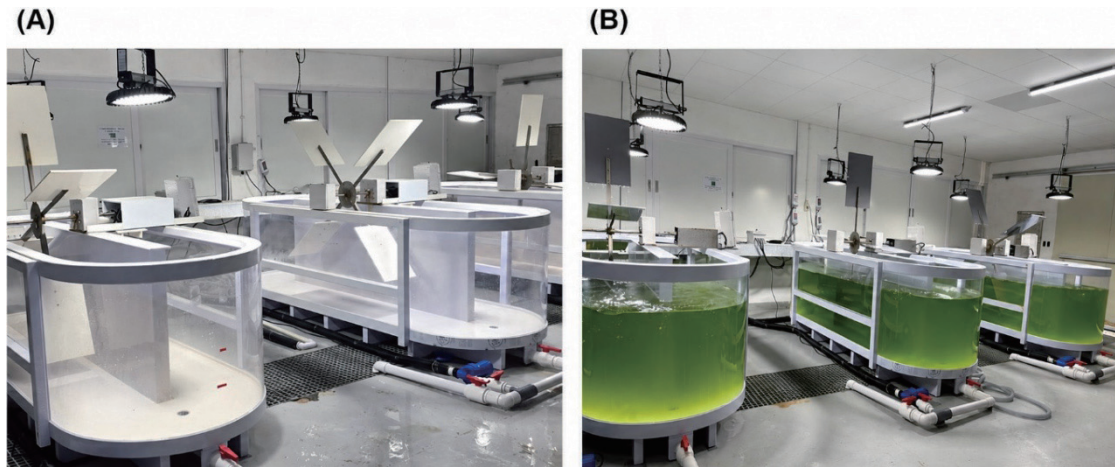


Fig. 1. Paddlewheel-driven raceway tanks used for 2 m³ cultivation of four microalgal isolates. (A), empty raceway tank before inoculation; (B), raceway tanks during cultivation.

기 구간의 세포밀도를 이용하여 다음 식으로 산출하였다.

$$\mu = [\ln(N_2) - \ln(N_1)] / (t_2 - t_1) \quad (N_1, N_2 \text{는 각각 } t_1, t_2 \text{ 시점 세포밀도; } t_1, t_2 \text{는 배양 시간})$$

분리주 참굴 유생 먹이생물 이용성 평가

참굴 유생의 발달단계에 따른 4개 분리주의 섭취율을 평가하였다. 실험에는 D형 유생($62 \pm 6 \mu\text{m}$), 각정 초기 유생($125 \pm 15 \mu\text{m}$), 각정 중기 유생($190 \pm 20 \mu\text{m}$) 및 각정 후기 유생($280 \pm 25 \mu\text{m}$)을 사용하였다. 유생은 국립수산물연구원 남동해수산연구소에서 종자생산 시험을 위해 생산하여 관리 중인 개체를 발달단계별로 선별하여 사용하였다. 실험 전 유생의 소화관에 남아 있는 먹이를 제거하기 위해 수온 $28 \pm 1^\circ\text{C}$ ($1 \mu\text{m}$ 여과해수)에서 24 h 동안 절식하였다.

발달단계별 섭취율 조사는 50 mL conical tube에 참굴 유생을 10개체/mL의 밀도로 수용하여 수행하였다. 각 분리주는 단일 먹이원으로 공급하였다. 공급농도는 유생의 발달단계별 먹이 요구량을 고려하여 D형 유생 $1 \times 10^5 \text{ cells/mL}$, 각정 초기 유생 $2 \times 10^5 \text{ cells/mL}$, 각정 중기 유생 $3 \times 10^5 \text{ cells/mL}$ 및 각정 후기 유생 $4 \times 10^5 \text{ cells/mL}$ 로 설정하였다. 실험기간 동안 수온은 $28 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.

섭취율(ingestion rate, IR)은 먹이 공급 2 h 후 유생의 장내 미세조류의 존재 유무를 광학현미경으로 3반복 확인하였으며, 아래의 식으로 산출하였다.

$$\text{IR}(\%) = N_i / N_t \times 100 \quad (N_i, \text{장내 미세조류가 확인된 유생 수; } N_t, \text{관찰한 전체 유생 수})$$

통계처리

실험구 간 유의성 검정은 평균 간 분산분석(analysis of vari-

ance, ANOVA)을 실시한 후 유의성이 인정될 때 Duncan's multiple range test를 이용하여 사후검정을 실시하였다. 통계적 유의수준은 $P < 0.05$ 로 설정하였고, 모든 통계분석은 SPSS version 23.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 이용하여 수행하였다.

결과 및 고찰

미세조류 분리주 확보

채집 시료를 평판배지에서 배양한 결과, 색상과 형태가 서로 다른 다수의 미세조류 집락이 관찰되었다. 이들 가운데 다른 미세조류의 혼입이 확인되지 않고 계대배양 과정에서 안정적으로 증식한 4개 분리주를 확보하였다.

광학현미경 관찰 결과, 전남 신안군(SA), 전남 완도군(WD), 전남 고흥군(GH) 및 경남 통영시(TY)에서 확보한 분리주는 서로 다른 형태적 특성을 나타냈다. SA는 크기 $10\text{--}12 \mu\text{m}$ 의 녹색 난형 세포였으며, 운동성과 2개의 편모가 관찰되었다. WD는 크기 $1\text{--}2 \mu\text{m}$ 의 소형 녹색 세포로 구형 또는 난형이었으며, 운동성과 편모는 관찰되지 않았다. GH는 크기 $7.6\text{--}11.5 \mu\text{m}$ 의 적색 세포로 구형 또는 난형이었으며, 운동성과 편모는 관찰되지 않았다. TY는 크기 $10\text{--}15 \mu\text{m}$ 의 녹색 난형 세포였으며, 뚜렷한 운동성과 4개의 편모가 관찰되었다(Fig. 2).

형태적 특성에 근거하여 SA, WD 및 TY는 녹조류로, GH는 홍조류로 잠정 분류되었다. 그러나 미세조류의 세포 크기와 형태는 배양조건과 생리상태에 따라 달라질 수 있으며, 단순한 형태를 지닌 소형 단세포 미세조류는 광학현미경 관찰만으로 정확하게 구분하기 어렵다(Leliaert et al., 2014). 그러므로 이를 보완하기 위해 분자생물학적 종 동정을 추가로 진행하였다.

분자생물학적 종 동정

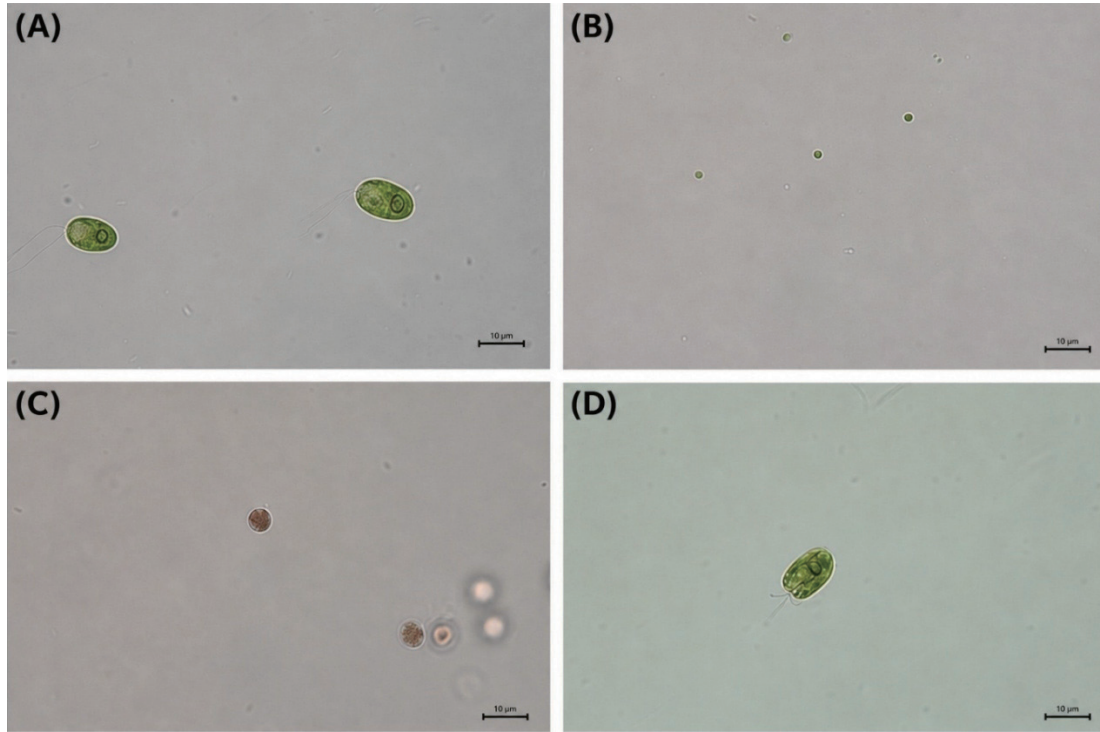


Fig. 2. Light micrographs of four microalgal isolates from Korean coastal waters. (A) *Dunaliella bioculata* (SA); (B) *Picochlorum* aff. *costavermella* (WD); (C) *Porphyridium* aff. *purpureum* (GH); (D) *Tetraselmis chuii* (TY). Scale bars indicate 10 µm.

분자생물학적 동정을 위해 SA, WD, GH 및 TY의 ribosomal DNA 염기서열을 분석하였다. 확보한 염기서열의 길이는 286–1,751 bp이었다. 각 염기서열은 NCBI GenBank database 등록 서열과 비교하였으며, 비교에는 BLAST 검색을 이용하였다(Table 3).

SA의 LSU D2/D3 영역 염기서열은 575 bp였으며, BLAST 분석 결과 *Dunaliella bioculata* (DQ015740.1)와 query coverage 100% 및 sequence identity 100%를 나타내어 *D. bioculata*로 동정하였다. WD의 ITS-LSU D1 부분 서열은 286 bp였으며,

BLAST 분석 결과 *Picochlorum costavermella* (MT489383.1)와 query coverage 100% 및 sequence identity 94.8%를 나타냈다. GH의 ITS-LSU D1 부분 서열은 297 bp였으며, *Porphyridium purpureum* (EU818942.2)과 query coverage 97.0% 및 sequence identity 96.5%를 나타냈다. TY의 18S rDNA 염기서열은 1,751 bp였으며, *Tetraselmis chuii* (JN903999.1)와 query coverage 100% 및 sequence identity 100%를 나타내어 *T. chuii*로 동정하였다.

본 연구에서 분자생물학적 분석은 분리주의 종 수준 분류를

Table 3. Putative molecular identification of four microalgal isolates based on BLAST analysis of partial ribosomal DNA sequences

Isolate	Marker region	Primer pair	Sequence length (bp)	Closest match in GenBank	Accession no. of closest match	Query coverage (%)	Sequence identity (%)	Final identification
SA	LSU D2/D3	T16N/T24U	575	<i>Dunaliella bioculata</i>	DQ015740.1	100.0	100.0	<i>Dunaliella bioculata</i>
WD	ITS-LSU D1	ITS1/LSU D1	286	<i>Picochlorum costavermella</i>	MT489383.1	100.0	94.8	<i>Picochlorum</i> aff. <i>costavermella</i>
GH	ITS-LSU D1	ITS1/LSU D1	297	<i>Porphyridium purpureum</i>	EU818942.2	97.0	96.5	<i>Porphyridium</i> aff. <i>purpureum</i>
TY	18S rDNA	NS1/NS8	1,751	<i>Tetraselmis chuii</i>	JN903999.1	100.0	100.0	<i>Tetraselmis chuii</i>

SA, WD, GH, and TY denote isolates collected from Sinan-gun in Jeollanam-do, Wando-gun in Jeollanam-do, Goheung-gun in Jeollanam-do, and Tongyeong-si in Gyeongsangnam-do, respectively. BLAST, basic local alignment search tool; ITS, internal transcribed spacer; LSU, large subunit; rDNA, ribosomal DNA. The abbreviation aff. indicates affinity to the referenced species based on partial sequence similarity.

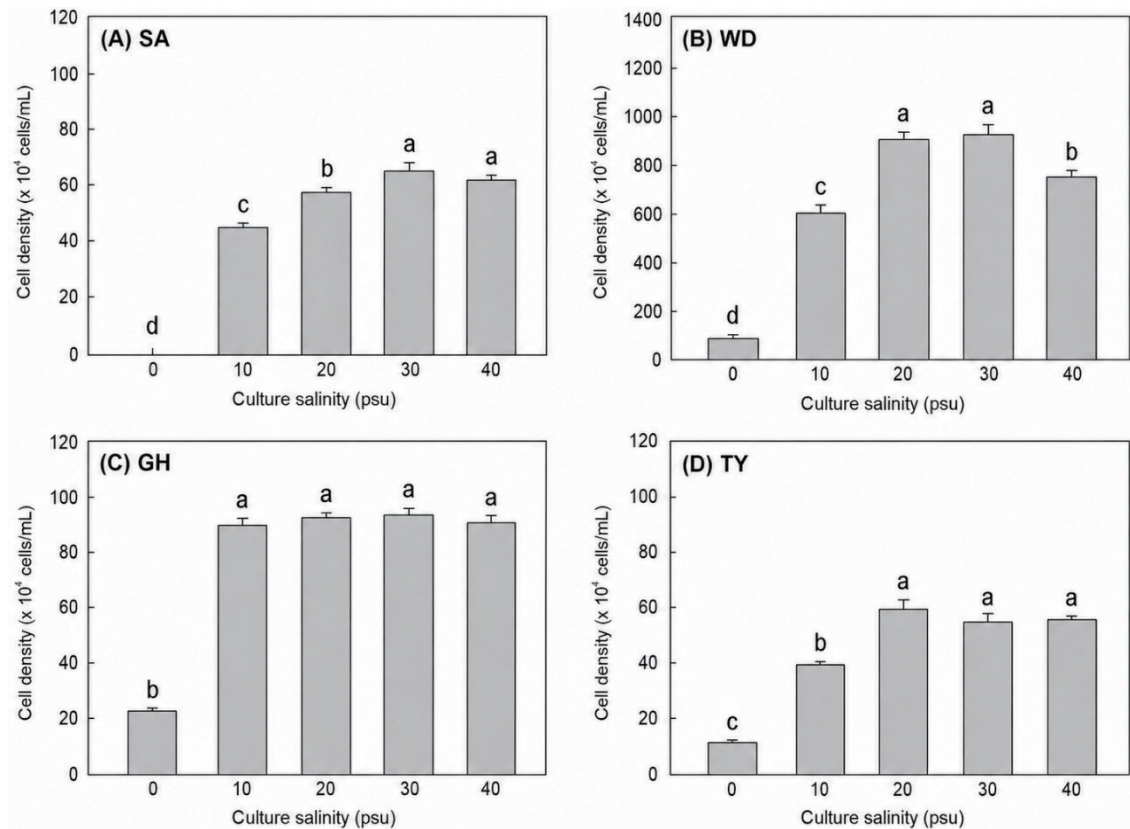


Fig. 3. Cell densities of four microalgal isolates from Korean coastal waters after 8 days of cultivation at different salinities. (A) SA, Sinan-gun in Jeollanam-do; (B) WD, Wando-gun in Jeollanam-do; (C) GH, Goheung-gun in Jeollanam-do; (D) TY, Tongyeong-si in Gyeongsangnam-do. Values are presented as means $\pm$ SD ($n=3$). Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among salinity treatments within each isolate according to Duncan's multiple range test ($P<0.05$). SD, standard deviation.

확정하는 것보다 각 분리주의 분류학적 근연성을 확인하고, 실험에서 관찰된 배양 특성을 관련 분류군의 선행연구와 비교·해석하기 위한 목적으로 수행하였다. SA와 TY는 확보한 염기서열에서 높은 query coverage와 sequence identity를 나타냈으나, WD와 GH는 비교적 짧은 ITS-LSU D1 부분 서열을 기반으로 분석하였으므로 종 수준의 동정에는 한계가 있었다. 이에 두 분리주는 각각 *Picochlorum* aff. *costavermella*와 *Porphyridium* aff. *purpureum*으로 표기하였다. 기보고된 근연종의 생리적 특성은 WD와 GH의 배양 결과를 해석하기 위한 참고자료로 활용하였으며, 두 분리주의 배양 특성은 본 연구에서 직접 측정된 결과를 기준으로 판단하였다. 이들 분리주의 정확한 분류학적 위치를 확인하기 위해서는 추가 분자마커를 이용한 계통학적 분석이 필요할 것으로 사료된다.

분리주 염분 및 온도 조건별 배양 특성

분리주의 염분 및 온도에 따른 배양 특성은 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 염분에 따른 배양 결과, SA의 세포밀도는 0 psu에서 초기 세포밀도보다 감소하였으나, 10 psu 이상에서는

증가하였다. 30과 40 psu에서 세포밀도는 각각 $64.9 \pm 2.7 \times 10^4$ 및 $61.8 \pm 1.3 \times 10^4$ cells/mL이었다. 세포밀도는 30 psu에서 가장 높았으나, 40 psu와 유의한 차이는 없었다. Hamed et al. (2017)은 튀르키예 Tuz Lake에서 분리한 *Dunaliella* sp.를 25–35 psu에서 배양한 결과, 염분에 따른 세포밀도는 유의차가 없다고 보고하였다. 이는 SA의 세포밀도가 30과 40 psu에서 유의한 차이를 보이지 않은 결과와 유사한 경향이였다. SA는 10–40 psu에서 증식하여 넓은 염분 범위에 대한 배양 특성을 나타냈다.

WD의 세포밀도는 0, 10, 20, 30 및 40 psu에서 각각 $68.9 \pm 8.2 \times 10^4$, $606.7 \pm 6.7 \times 10^4$, $896.7 \pm 12.0 \times 10^4$, $914.4 \pm 15.0 \times 10^4$ 및 $753.3 \pm 8.8 \times 10^4$ cells/mL이었다. 세포밀도는 0–20 psu에서 염분농도가 높아짐에 따라 증가하였으며, 20과 30 psu 배양구 간에는 유의한 차이가 없었다. 40 psu에서는 30 psu보다 감소하였다. Krasovec et al. (2018)은 *P. costavermella*가 NaCl을 10–70 g/L 첨가한 조건에서 성장하였으며, 20 g/L에서 가장 높은 성장률을 나타냈다고 보고하였다. 본 연구에서도 WD는 0–40 psu에서 증식하여 넓은 염분 범위

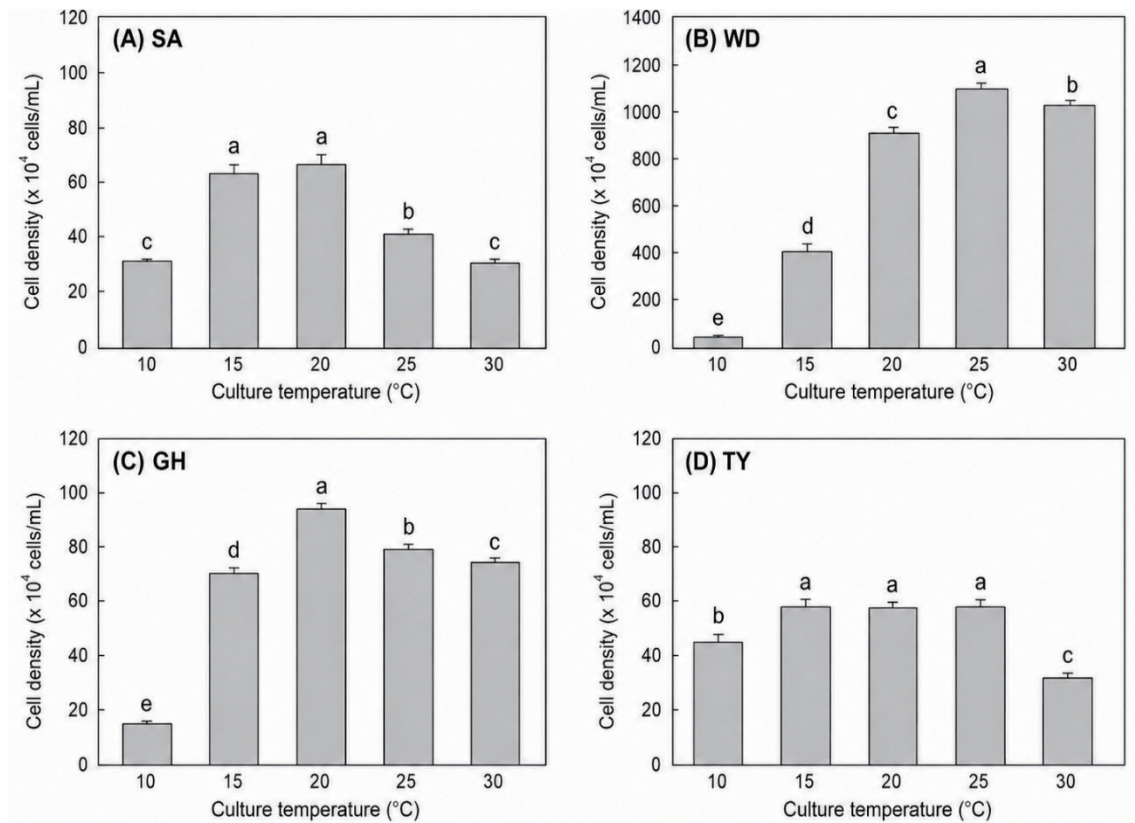


Fig. 4. Cell densities of four microalgal isolates from Korean coastal waters after 8 days of cultivation at different temperatures. (A) SA, Sinan-gun in Jeollanam-do; (B) WD, Wando-gun in Jeollanam-do; (C) GH, Goheung-gun in Jeollanam-do; (D) TY, Tongyeong-si in Gyeongsangnam-do. Values are presented as means $\pm$ SD ($n=3$). Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among temperature treatments within each isolate according to Duncan's multiple range test ($P<0.05$). SD, standard deviation.

에 적응하는 배양 특성을 나타냈다.

GH의 세포밀도는 0, 10, 20, 30 및 40 psu에서 각각 $22.3 \pm 0.3 \times 10^4$, $89.4 \pm 2.3 \times 10^4$, $93.3 \pm 0.6 \times 10^4$, $93.8 \pm 1.2 \times 10^4$ 및 $89.2 \pm 4.5 \times 10^4$ cells/mL이었다. GH는 0 psu에서도 증식하였으나, 세포밀도는 10–40 psu보다 낮았다. 10–40 psu에서는 세포밀도에 유의한 차이가 나타나지 않았다. Ferreira et al. (2021)은 *P. purpureum*이 18, 32 및 50 g/L NaCl 조건에서 성장하였으며, 32 g/L에서 가장 높은 성장률을 나타냈다고 보고하였다. Decamp et al. (2023)은 염분이 *Porphyridium cruentum*의 성장과 다당류 대사에 영향을 미친다고 보고하였다. 이러한 결과를 고려할 때, GH는 10–40 psu에서 일정한 수준의 세포밀도를 나타내는 특성을 보였다.

TY의 세포밀도는 0, 10, 20, 30 및 40 psu에서 각각 $12.0 \pm 0.9 \times 10^4$, $40.7 \pm 0.9 \times 10^4$, $59.1 \pm 2.9 \times 10^4$, $56.7 \pm 1.7 \times 10^4$ 및 $56.2 \pm 0.2 \times 10^4$ cells/mL이었다. 세포밀도는 0–20 psu에서 염분이 높아짐에 따라 유의하게 증가하였다. 20 psu에서 가장 높은 세포밀도를 나타냈으며, 30과 40 psu에서는 평균값이 감소하였으나 20 psu와 유의한 차이는 없었다. Haris et al. (2022)은

염분이 *T. chuii*의 성장과 일반성분 조성에 영향을 미쳤으며, 40 ppt에서 가장 높은 세포밀도를 나타냈다고 보고하였다. 본 연구에서도 염분 조건에 따라 TY의 세포밀도가 달라져, 염분이 성장에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

온도에 따른 SA의 세포밀도는 10, 15, 20, 25 및 30°C에서 각각 $32.3 \pm 0.6 \times 10^4$, $63.7 \pm 2.1 \times 10^4$, $66.7 \pm 3.1 \times 10^4$, $41.3 \pm 1.2 \times 10^4$ 및 $31.3 \pm 1.2 \times 10^4$ cells/mL이었다. 가장 높은 세포밀도는 20°C에서 나타났으나, 15°C와 유의한 차이는 없었다. SA는 15–20°C에서 상대적으로 높은 세포밀도를 나타냈으며, 25°C 이상에서는 세포밀도가 감소하는 경향을 보였다. Hamed et al. (2017)은 Tuz Lake에서 분리한 *Dunaliella* sp.에서 배양온도가 증가함에 따라 세포밀도와 chlorophyll a 함량이 감소하였다고 보고하였다. 본 연구에서도 20°C 이후 온도가 증가할수록 SA의 세포밀도가 감소하여 선행연구와 유사한 경향을 보였다.

WD의 세포밀도는 10, 15, 20, 25 및 30°C에서 각각 $31.7 \pm 2.5 \times 10^4$, $403.3 \pm 15.3 \times 10^4$, $926.7 \pm 23.1 \times 10^4$, $1,113.3 \pm 25.2 \times 10^4$ 및 $1,046.7 \pm 11.5 \times 10^4$ cells/mL였다. 세

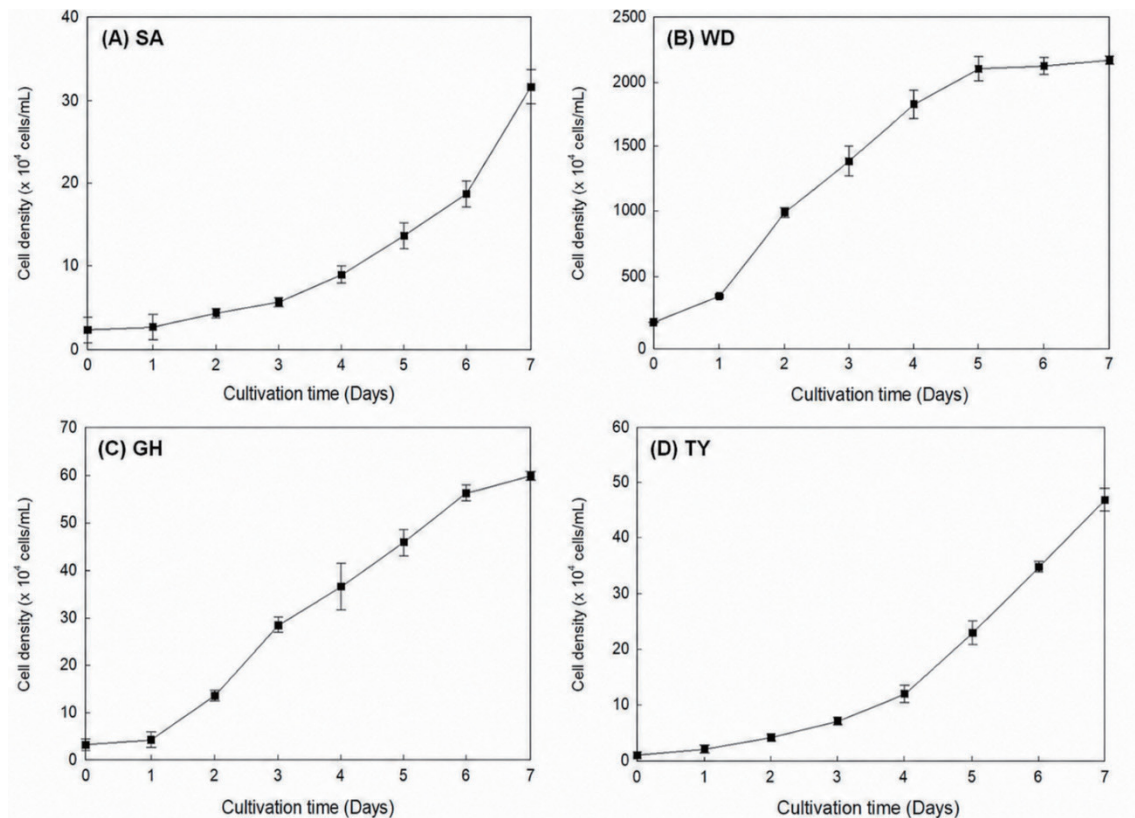


Fig. 5. Changes in cell density of four microalgal isolates during cultivation in 2 m³ paddlewheel-driven raceway tanks. (A) SA, Sinan-gun in Jeollanam-do; (B) WD, Wando-gun in Jeollanam-do; (C) GH, Goheung-gun in Jeollanam-do; (D) TY, Tongyeong-si in Gyeongsangnam-do. Values are presented as means±SD ($n=3$). SD, standard deviation.

포밀도는 10–25°C에서 온도가 높아짐에 따라 유의하게 증가하였으며, 30°C에서는 25°C보다 유의하게 감소하였다. 그러나 WD는 20–30°C에서 상대적으로 높은 세포밀도를 나타냈으며, 세포밀도는 25°C에서 가장 높게 확인되었다. Krasovec et al. (2018)은 *P. costavermella*가 35°C에서도 성장할 수 있다고 보고하였다. 본 연구에서도 WD는 비교적 넓은 염분 및 온도 범위에서 증식하였다. 다만, 기보고종과의 세부적인 세포밀도 반응 및 최적 배양조건 차이는 분리주 고유의 생리적 특성과 광도, 배지 조성 및 배양기간 등 실험조건에 차이에 기인한 것으로 판단된다.

온도에 따른 GH의 세포밀도는 10, 15, 20, 25 및 30°C에서 각각 $14.7 \pm 1.2 \times 10^4$, $71.0 \pm 1.0 \times 10^4$, $95.0 \pm 3.0 \times 10^4$, $80.7 \pm 2.5 \times 10^4$ 및 $76.3 \pm 2.1 \times 10^4$ cells/mL이었다. 세포밀도는 10–20°C에서 온도가 높아짐에 따라 유의하게 증가하였으며, 20°C에서 가장 높았다. 25 및 30°C에서는 20°C보다 유의하게 낮았다. Joo and Choi (2008)는 *P. cruentum*의 최적 배양 온도를 25°C로 보고하였으나, 본 연구에서 GH의 세포밀도는 20°C에서 가장 높았다. GH에서 관찰된 염분 및 온도 반응과 기 보고된 *P. purpureum* 및 *P. cruentum*의 결과 간 차이는 분류학

적 근연성만으로 설명하기 어려우므로 분리주 고유의 생리적 특성에 대한 추가적인 조사가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

온도에 따른 TY의 세포밀도는 10, 15, 20, 25 및 30°C에서 각각 $46.7 \pm 1.2 \times 10^4$, $58.3 \pm 2.1 \times 10^4$, $58.3 \pm 2.9 \times 10^4$, $59.0 \pm 2.6 \times 10^4$ 및 $32.3 \pm 0.6 \times 10^4$ cells/mL이었다. 15–25°C에서는 세포밀도에 유의한 차이가 없었다. 세포밀도는 30°C에서 가장 낮았으며, 10°C에서도 15–25°C보다 낮았다. Chen et al. (2012)은 *T. chuii*의 최적 성장온도를 25°C로 제시하였으며, 20–30°C에서 생체량 생산에 유의한 차이가 없다고 보고하였다. 본 연구에서는 TY가 15–25°C에서 일정한 수준의 세포밀도를 나타냈으나 30°C에서 감소하여, 선행연구와 온도 반응 범위에 차이를 보였다.

분리주 대량배양 평가

4개 분리주의 상업적 규모 확대를 위한 기초 배양자료를 확보하기 위해 2 m³ 규모 회전수차식 트랙형 배양수조에서 대량배양을 수행한 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

SA의 세포밀도는 배양 0일차 $2.3 \pm 1.5 \times 10^4$ cells/mL에서 4일차 $9.0 \pm 1.0 \times 10^4$ cells/mL로 증가하였다. 이후 6일차

$18.7 \pm 1.5 \times 10^4$ cells/mL, 7일차 $31.7 \pm 2.1 \times 10^4$ cells/mL에 도달하였다. SA는 배양 1-7일차에 지수성장을 나타냈으며, 이 기간의 비성장률은 0.412 day^{-1} 이었다. 배양 종료 시 세포밀도는 초기보다 약 13.8배였다. 세포밀도는 배양 종료일까지 지속적으로 증가하여 배양기간 내 정체기에 도달하지 않았다. Wu et al. (2017)은 *Dunaliella salina*를 회전수차식 수조에서 대량 배양한 결과, 배양 4일차에 최대 세포밀도에 도달하였다고 보고하였다. 반면, 본 연구의 SA는 배양 7일차까지 세포밀도가 증가하였다. 이러한 차이는 분리주뿐만 아니라 초기 세포밀도, 배지, 광도, 온도 및 염분 등 배양조건의 차이와 관련된 것으로 판단된다. Chuka-ogwude et al. (2021)은 회전수차식 수조에서 *D. salina*를 배양한 결과, 주간 12 h의 혼합만으로도 24 h 혼합과 유사한 생산성을 확보할 수 있다고 보고하였다. 본 연구에서 SA는 2 m^3 규모의 회전수차식 수조에서 배양 종료일까지 지속적으로 증식하여 대량배양 가능성을 보였다. 다만, 최대 세포밀도와 적정 수확시점을 확인하기 위해서는 배양기간을 연장한 추가 평가가 필요할 것으로 판단된다.

WD의 세포밀도는 배양 0일차 $187.7 \pm 2.3 \times 10^4$ cells/mL에서 2일차 $1,003.3 \pm 38.8 \times 10^4$ cells/mL로 증가하였다. WD는 배양 0-2일차에 지수성장을 나타냈으며, 이 기간의 비성장률은 0.838 day^{-1} 이었다. 이후 세포밀도는 4일차 $1,840.0 \pm 107.9 \times 10^4$ cells/mL, 5일차 $2,106.7 \pm 90.2 \times 10^4$ cells/mL에 도달하였다. 5일차 이후 증가폭은 감소하였으며, 7일차 $2,173.3 \pm 30.6 \times 10^4$ cells/mL로 나타났다. 배양 종료 시 세포밀도는 초기보다 약 11.6배 증가하였다. 이러한 결과는 WD가 2 m^3 규모의 회전수차식 수조에서도 높은 세포밀도로 증식할 수 있음을 보여준다. Dahlin et al. (2019)은 *Picochlorum renovo*가 빠른 성장과 넓은 염분 및 온도 내성을 나타내어 대량생산에 적합한 특성을 지닌다고 보고하였다. 본 연구에서도 WD는 배양 초기에 세포밀도가 빠르게 증가하였으며, 배양 후반부까지 높은 세포밀도를 유지하였다.

GH의 세포밀도는 배양 0일차 $3.7 \pm 1.2 \times 10^4$ cells/mL에서 1일차 $4.7 \pm 1.5 \times 10^4$ cells/mL로 증가하였다. 이후 2일차 $13.7 \pm 1.2 \times 10^4$ cells/mL, 3일차 $28.7 \pm 1.5 \times 10^4$ cells/mL로 증가하였다. GH는 배양 1-3일차에 지수성장을 나타냈으며, 이 기간의 비성장률은 0.908 day^{-1} 이었다. 이후 세포밀도의 증가 속도는 감소하였으며, 6일차와 7일차는 각각 $56.3 \pm 1.5 \times 10^4$ 및 $60.0 \pm 1.0 \times 10^4$ cells/mL에 도달하였다. 배양 종료 시 세포밀도는 초기보다 약 16.2배였다. 6일차 이후에는 증가폭이 감소하여 배양 후반부에 증가가 둔화되었다. Gao et al. (2023)은 *P. cruentum*을 옥외 회전수차식 수조에서 배양하여 배양기간 동안 생체량이 증가하였음을 보고하였다. 해당 연구는 본 연구와 평가 지표 및 배양규모는 다르지만, *Porphyridium* 속 미세조류가 회전수차식 수조에서 대량배양된 사례라는 점에서 참고할 수 있다. 본 연구에서도 GH는 2 m^3 회전수차식 수조에서 배양 종료일까지 세포밀도가 증가하였다. 다만 6일차 이후 증

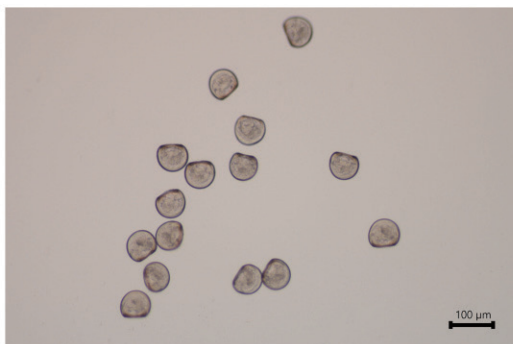
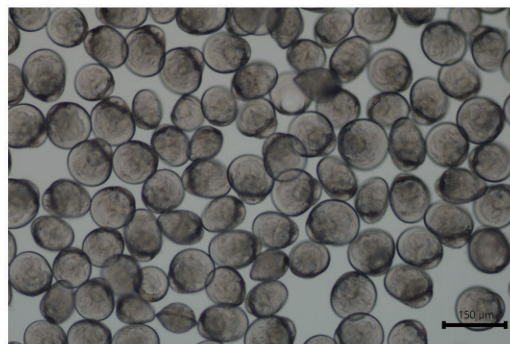
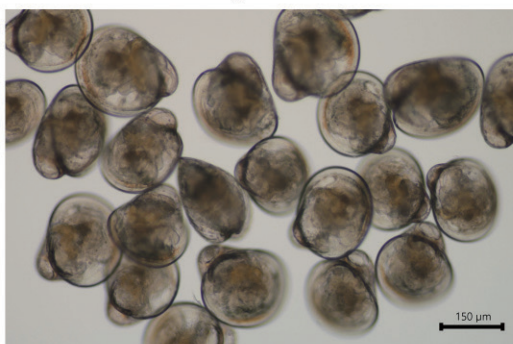
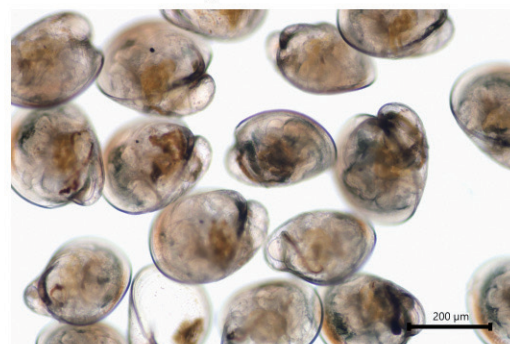
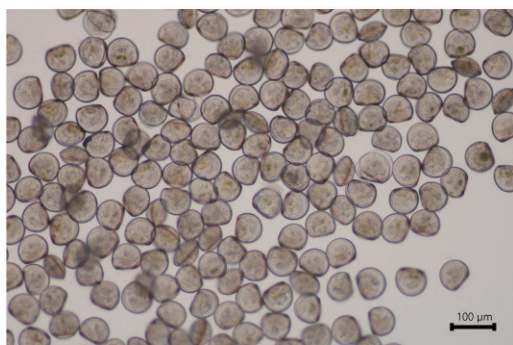
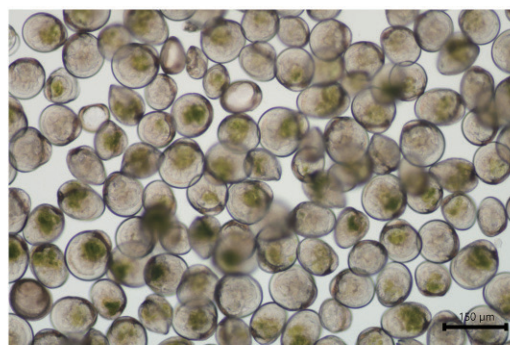
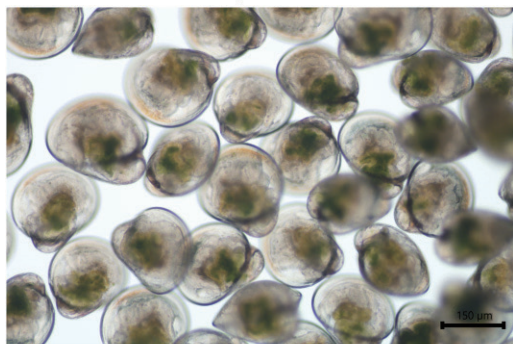
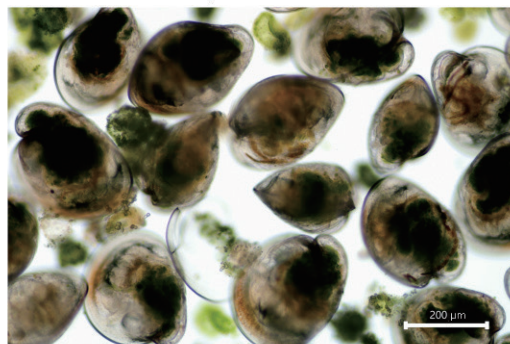
가폭이 감소하였으므로 최대 세포밀도와 적정 수확시점을 확인하기 위해서는 배양기간을 연장한 추가 평가가 필요할 것으로 판단된다.

TY의 세포밀도는 배양 0일차 $1.3 \pm 0.6 \times 10^4$ cells/mL에서 4일차 $12.3 \pm 1.5 \times 10^4$ cells/mL로 증가하였다. 이후 5일차 $23.3 \pm 2.1 \times 10^4$ cells/mL, 6일차 $35.0 \pm 1.0 \times 10^4$ cells/mL, 7일차에는 $47.0 \pm 2.0 \times 10^4$ cells/mL에 도달하였다. TY는 배양 0-6일차에 지수성장을 나타냈으며, 이 기간의 비성장률은 0.545 day^{-1} 이었다. 배양 종료 시 세포밀도는 초기보다 약 36.2배였으나, 배양 종료일까지 지속적으로 증가하여 배양기간 내 정체기에 도달하지 않았다. *Tetraselmis* 속 미세조류는 대규모 회전수차식 수조에서 배양된 사례가 보고되어 있다. Das et al. (2016)은 대규모 회전수차식 수조에서 *Tetraselmis* sp.의 운전 방식에 따른 성장 차이를 평가하였으며, Das et al. (2019)은 회전수차식 수조에서 내염성 *Tetraselmis* sp.의 장기 반연속 배양을 수행하였다. 이러한 연구는 *Tetraselmis* 속 미세조류의 대량 배양에서 수조 운전조건과 장기 배양 안정성을 함께 고려해야 함을 보여준다. 본 연구의 TY는 배양 7일차까지 세포밀도가 지속적으로 증가하여 배양기간 내 정체기에 도달하지 않았다. 따라서 현재 결과만으로 도달 가능한 최대 세포밀도와 적정 수확시점을 결정하기는 어려우며, 배양기간을 연장하여 생산 안정성을 확인할 필요가 있다.

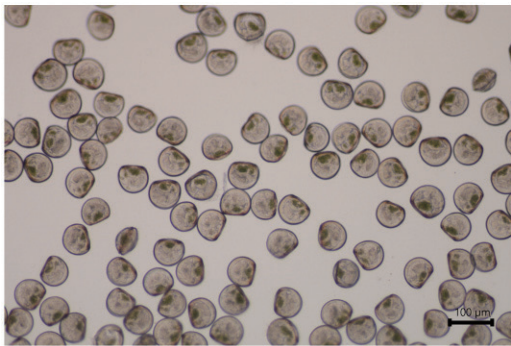
국내 연안에서 확보한 4개 분리주는 2 m^3 회전수차식 수조에서 배양기간 동안 세포밀도가 증가하였다. 초기 세포밀도보다 증가배수는 접종농도의 영향을 크게 받을 것으로 판단되어 분리주 간 성장속도를 비교하는 지표로 사용하지 않았다. 대신 각 분리주의 성장속도는 지수성장기 구간의 세포밀도 자료로 산출한 비성장률을 기준으로 평가하였으며, 배양 종료 시 세포밀도는 해당 배양규모에서 최종적으로 확보된 세포밀도로 해석하였다. WD와 GH는 배양 후반부에 세포밀도 증가가 둔화된 반면, SA와 TY는 배양 종료일까지 지속적으로 증가하였다. 따라서 SA와 TY의 도달 가능한 최대 세포밀도와 적정 수확시점을 확인하기 위해서는 배양기간을 연장한 추가 평가가 필요하다. 본 연구의 4개 분리주는 세포별 성장경향을 기준으로 참굴 유생용 먹이생물로서 활용 가능성이 높은 것으로 판단되며, 국내 연안에서 확보한 분리주를 참굴 종자생산 먹이생물로 공급하기 위한 대량배양의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

분리주 참굴 유생 먹이생물 이용성 평가

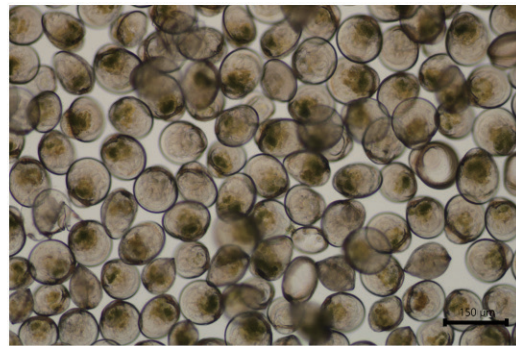
참굴 유생 발달단계에 따른 분리주별 섭취율은 Table 4와 Fig. 6에 나타내었다. SA, WD, GH 및 TY를 각각 단독 공급한 결과, D형 유생의 섭취율은 각각 $60.9 \pm 1.8\%$, $93.6 \pm 3.2\%$, $0.0 \pm 0.0\%$ 및 $0.0 \pm 0.0\%$ 이었다. 각정 초기 유생에서 각각 $76.0 \pm 1.8\%$, $95.4 \pm 3.3\%$, $0.2 \pm 0.3\%$ 및 $40.7 \pm 11.6\%$ 이었으며, 각정 중기 유생에서 각각 $100.0 \pm 0.0\%$, $96.1 \pm 2.8\%$, $100.0 \pm 0.0\%$ 및 $86.2 \pm 3.9\%$ 이었다. 각정 후기 유생의 섭

(A) Starved control**D-shaped larvae****Early umbo larvae****Middle umbo larvae****Late umbo larvae****(B) SA****D-shaped larvae****Early umbo larvae****Middle umbo larvae****Late umbo larvae**

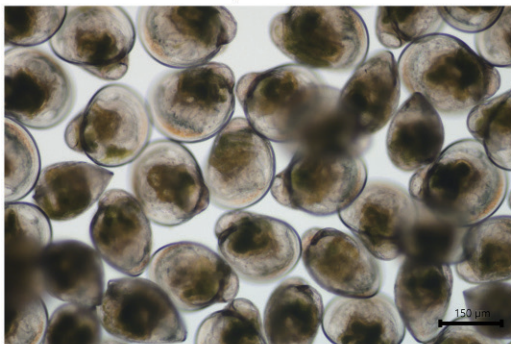
(C) WD



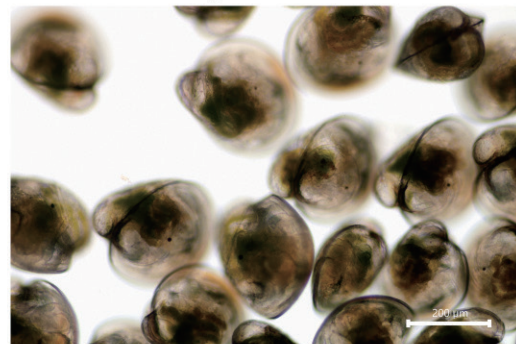
D-shaped larvae



Early umbo larvae

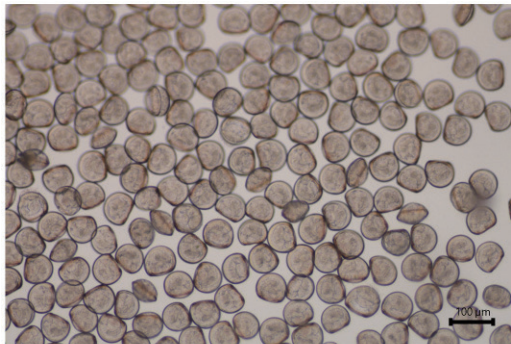


Middle umbo larvae

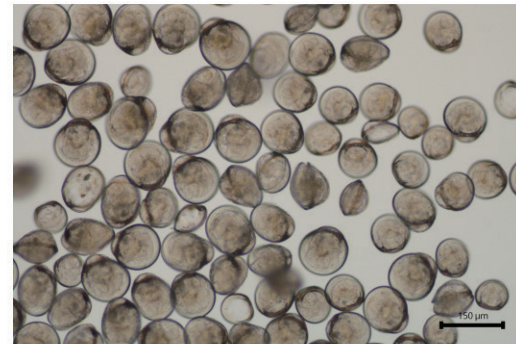


Late umbo larvae

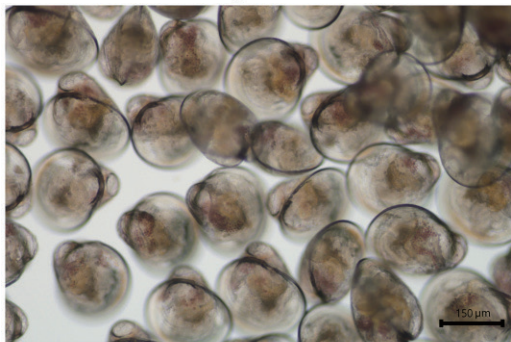
(D) GH



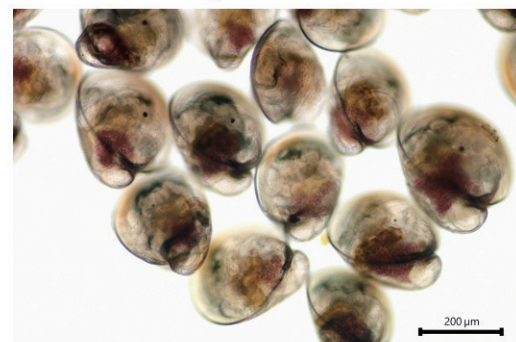
D-shaped larvae



Early umbo larvae



Middle umbo larvae



Late umbo larvae

(E) TY

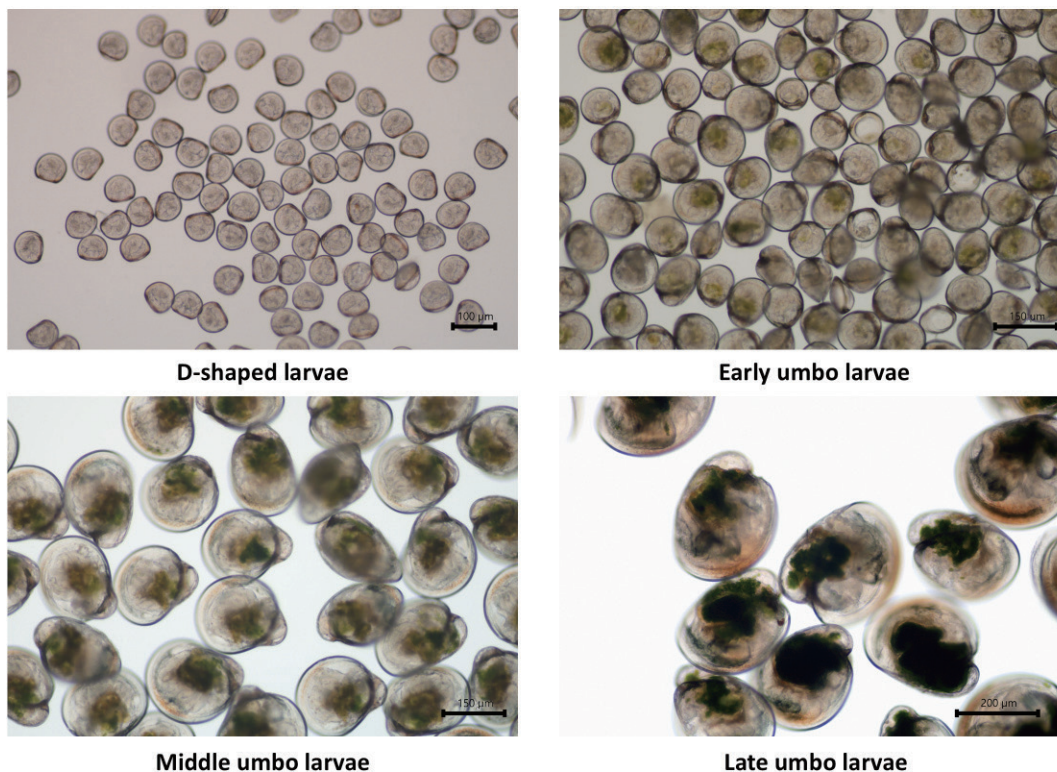


Fig. 6. Representative light micrographs showing the ingestion of four microalgal isolates by larvae of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* at different developmental stages. SA, Sinan-gun in Jeollanam-do; WD, Wando-gun in Jeollanam-do; GH, Goheung-gun in Jeollanam-do; TY, Tongyeong-si in Gyeongsangnam-do. Within each panel, the larval stages are arranged as follows: D-shaped larva, upper left; early umbo larva, upper right; middle umbo larva, lower left; and late umbo larva, lower right. Scale bars indicate 100 μ m for D-shaped larvae, 150 μ m for early and middle umbo larvae, and 200 μ m for late umbo larvae.

취율은 각각 $100.0 \pm 0.0\%$, $96.5 \pm 1.2\%$, $100.0 \pm 0.0\%$ 및 $100.0 \pm 0.0\%$ 였다. WD는 모든 유생 발달단계에서 90% 이상의 섭취율을 나타냈으며, SA, GH 및 TY의 섭취율은 유생의 발달이 진행됨에 따라 증가하였다.

참굴 유생의 미세조류 섭취 양상은 유생의 발달단계와 먹이 입자의 크기 및 형태에 따라 달라질 수 있다. Hur et al. (2011)은

장축과 단축이 모두 4.6 μ m 이하인 미세조류가 참굴 D형 유생에서 50% 이상의 섭취율을 나타냈으며, *Dunaliella tertiolecta*와 *Tetraselmis tetrathele*는 D형 유생에서는 섭취되지 않았으나 이후 발달단계에서는 섭취되었다고 보고하였다. 또한, Rosa and Padilla (2020)는 참굴 유생의 먹이 선택성이 발달단계에 따라 변화하며, 미세조류의 섭취 여부가 세포 크기만으로 결정

Table 4. Ingestion rates (%) of four microalgal isolates by larvae of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* at different developmental stages

Isolate	D-shaped larvae	Early umbo larvae	Middle umbo larvae	Late umbo larvae
SA	60.9 ± 1.8^b	76.0 ± 1.8^b	100.0 ± 0.0^a	100.0 ± 0.0^a
WD	93.6 ± 3.2^a	95.4 ± 3.3^a	96.1 ± 2.8^a	96.5 ± 1.2^b
GH	0.0 ± 0.0^c	0.2 ± 0.3^d	100.0 ± 0.0^a	100.0 ± 0.0^a
TY	0.0 ± 0.0^c	40.7 ± 11.6^c	86.2 ± 3.9^b	100.0 ± 0.0^a

SA, WD, GH, and TY denote isolates collected from Sinan-gun in Jeollanam-do, Wando-gun in Jeollanam-do, Goheung-gun in Jeollanam-do, and Tongyeong-si in Gyeongsangnam-do, respectively. Values are presented as means $\pm$ SD ($n=3$). Different superscript lowercase letters within the same column indicate significant differences among isolates at each larval developmental stage according to Duncan's multiple range test ($P < 0.05$). SD, standard deviation.

되지 않는다고 보고하였다.

SA는 선행연구의 *D. tertiolecta*와 달리 D형 유생에서도 섭취가 확인되었다. 이러한 차이는 동일한 *Dunaliella* 속에서도 종 또는 분리주에 따라 세포 크기, 형태 및 응집 상태 등의 물리적 특성이 다르기 때문일 수 있다. 따라서 초기 유생의 미세조류 섭취 여부를 해석할 때는 비구형 세포의 장축과 단축뿐만 아니라 세포의 응집 여부를 포함한 실제 입자 크기를 함께 고려할 필요가 있다.

*P. costavermella*는 길이 1–2 μm , 폭 약 1 μm 의 작은 난형 세포로 보고되었다(Krasovec et al., 2018). WD의 작은 세포 크기는 D형 유생을 포함한 초기 발달단계에서 섭취가 용이했던 요인 중 하나로 판단된다. 이러한 결과는 WD가 참굴 초기 유생부터 섭취 가능한 먹이생물 후보임을 보여준다.

GH는 D형 유생과 각정 초기 유생에서 거의 섭취되지 않았으나, 각정 중기 유생 이후에는 섭취율이 크게 증가하였다. 이러한 발달단계별 차이는 GH의 단일세포 크기만으로 충분히 설명하기 어렵다. *P. purpureum*은 세포외다당류를 생산하며, 질소 결핍 조건에서 세포 외부의 점성 다당류층이 두꺼워지는 것으로 보고되었다(Ji et al., 2021). 또한, *Porphyridium* sp.의 세포외다당류는 높은 분자량과 점성을 갖는 것으로 알려져 있다(Geresh et al., 2002). 이러한 특성은 배양액에서 세포의 분산 상태와 유생이 실제로 접하는 입자 크기에 영향을 줄 수 있다. 따라서, 초기 유생에서 나타난 제한적인 섭취에는 단일세포 크기뿐만 아니라 세포의 분산 또는 응집 상태가 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 다만, 본 연구에서는 GH의 응집체 형성과 실제 입자 크기를 측정하지 않았으므로, 이를 초기 유생의 낮은 섭취율에 대한 직접적인 원인으로 단정하기는 어렵다. 각정 중기 유생 이후 섭취율이 증가한 것은 유생의 성장에 따른 섭식 능력과 먹이 선택성의 변화와 관련된 것으로 해석된다.

TY는 D형 유생에서는 섭취되지 않았으나, 유생의 발달이 진행됨에 따라 섭취율이 증가하였다. 이는 선행연구의 *T. tetrahele*에서 나타난 발달단계별 섭취 양상과 유사하였다. TY의 섭취율 증가는 유생의 성장에 따른 섭취 가능 입자 범위의 확대와 먹이 포획 및 선택 능력의 변화가 함께 작용한 결과로 해석된다. 이러한 관계를 명확히 설명하기 위해서는 TY 세포의 장축과 단축, 응집 여부 및 실제 입자 크기를 유생 발달단계별 섭취 양상과 비교할 필요가 있다.

참굴 유생의 섭취율은 미세조류 분리주와 유생의 발달단계에 따라 달라졌다. SA는 D형 유생부터 섭취가 확인되었으며, WD는 모든 발달단계에서 90% 이상의 섭취율을 나타냈다. GH와 TY는 초기 유생에서 섭취가 제한적이었으나, 유생의 발달이 진행됨에 따라 섭취율이 증가하였다. 이는 미세조류의 세포 크기와 형태, 분산 상태 및 유생의 발달에 따른 섭식 능력의 변화와 관련되었을 가능성이 있다.

본 연구에서 섭취율은 각 분리주를 단독 공급한 후 2 h 뒤 소화관에서 미세조류가 확인된 유생의 비율로 산정하였다. 따라서,

본 결과는 각 분리주에 대한 참굴 유생의 단기 섭취 반응을 나타낼 뿐, 섭취된 미세조류의 소화·흡수 또는 영양원으로서의 이용을 의미하지 않는다고 판단된다. 또한, 본 실험만으로 각 분리주가 유생의 장기적인 성장과 생존, 변태 및 부착에 미치는 영향을 판단할 수 없다. 그러므로 먹이생물로서의 적합성과 인공종자 생산 적용성을 종합적으로 평가하기 위해서는 소화율과 영양분 흡수뿐만 아니라 유생의 성장률, 생존율, 변태율 및 부착률을 추적하는 장기 사육실험이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립수산물연구원 수산과학연구 ‘수하식 양식품종(참굴, 멍게)의 종자 관리 고도화 연구(R2026025)’ 및 ‘패류양식 먹이생물 확보 및 생산기술 개발(R2025046)’의 지원에 의해 수행되었다.

References

- Barra L, Chandrasekaran R, Corato F and Brunet C. 2014. The challenge of ecophysiological biodiversity for biotechnological applications of marine microalgae. *Mar Drugs* 12, 1641-1675. <https://doi.org/10.3390/md12031641>.
- Brown MR, Jeffrey SW, Volkman JK and Dunstan GA. 1997. Nutritional properties of microalgae for mariculture. *Aquaculture* 151, 315-331. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01501-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01501-3).
- Chen SY, Pan LY, Hong MJ and Lee AC. 2012. The effects of temperature on the growth of and ammonia uptake by marine microalgae. *Bot Stud* 53, 125-133.
- Chuka-ogwude D, Nafisi M, Vadiveloo A, Taher H, Bahri PA and Moheimani NR. 2021. Effect of medium recycling, culture depth, and mixing duration on *D. salina* growth. *Algal Res* 60, 102495. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102495>.
- Creswell L. 2010. Phytoplankton culture for aquaculture feed. SRAC Publication No. 5004. Southern Regional Aquaculture Center, Stoneville, MS, U.S.A., 1-16.
- Dahlin LR, Gerritsen AT, Henard CA, Van Wychen S, Linger JG, Kunde Y, Hovde BT, Starkenburg SR, Posewitz MC and Guarnieri MT. 2019. Development of a high-productivity, halophilic, thermotolerant microalga *Picochlorum renovo*. *Commun Biol* 2, 388. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0620-2>.
- Das P, Thaher MI, Hakim MAQMA, Al-Jabri HMSJ and Al-ghasal GSHS. 2016. A comparative study of the growth of *Tetraselmis* sp. in large scale fixed depth and decreasing depth raceway ponds. *Bioresour Technol* 216, 114-120. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.058>.
- Das P, Thaher M, AbdulQuadir M, Khan S, Chaudhary A and Al-Jabri H. 2019. Long-term semi-continuous cultivation of a halo-tolerant *Tetraselmis* sp. using recycled growth media. *Bioresour Technol* 276, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.058>.

- biortech.2018.12.108.
- Decamp A, Martineau E, Grizeau D, Pruvost J and Gonçalves O. 2023. Effects of the salinity on the biosynthesis of the polysaccharides of the marine microalgae *Porphyridium cruentum*. Algal Res 71, 103089. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103089>.
- Falkowski PG, Barber RT and Smetacek V. 1998. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. Science 281, 200-206. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.200>.
- Ferreira AS, Mendonça I, Póvoa I, Carvalho H, Correia A, Vilanova M, Silva TH, Coimbra MA and Nunes C. 2021. Impact of growth medium salinity on galactoxylan exopolysaccharides of *Porphyridium purpureum*. Algal Res 59, 102439. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102439>.
- Gao S, Edmundson SJ, Huesemann MH, Gutknecht AE, Laurens LML, Van Wychen S, Pittman KT and Greer M. 2023. DISCOVER strain screening pipeline - Part III: Strain evaluation in outdoor raceway ponds. Algal Res 70, 102990. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.102990>.
- Geresh S, Adin I, Yarmolinsky E and Karpasas M. 2002. Characterization of the extracellular polysaccharide of *Porphyridium* sp.: Molecular weight determination and rheological properties. Carbohydr Polym 50, 183-189. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00019-X).
- Guillard RRL. 1975. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. In: Culture of Marine Invertebrate Animals. Smith WL and Chanley MH, eds. Plenum Press, New York, NY, U.S.A., 29-60.
- Hamed I, Ak B, Isik O and Uslu L. 2017. The effects of salinity and temperature on the growth of *Dunaliella* sp. isolated from the Salt Lake (Tuz Gölü), Turkey. Turk J Fish Aquat Sci 17, 1367-1372. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v17_6_29.
- Haris N, Manan H, Jusoh M, Khatoon H, Katayama T and Kanan NA. 2022. Effect of different salinity on the growth performance and proximate composition of isolated indigenous microalgae species. Aquac Rep 22, 100925. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100925>.
- Helm MM, Bourne N and Lovatelli A. 2004. Hatchery Culture of Bivalves: A Practical Manual. FAO Fisheries Technical Paper No. 471. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), Rome, Italy, 1-177.
- Hotos GN and Avramidou D. 2021. The effect of various salinities and light intensities on the growth performance of five locally isolated microalgae [*Amphidinium carterae*, *Nephroselmis* sp., *Tetraselmis* sp. (var. red pappas), *Asteromonas gracilis* and *Dunaliella* sp.] in laboratory batch cultures. J Mar Sci Eng 9, 1275. <https://doi.org/10.3390/jmse9111275>.
- Hur YB, Jeon CY, Cho KC and Hur SB. 2011. Ingestion size of food microalgae of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* larvae. Korean J Malacol 27, 307-315. <https://doi.org/10.9710/kjm.2011.27.4.307>.
- Ji L, Li S, Chen C, Jin H, Wu H and Fan J. 2021. Physiological and transcriptome analysis elucidates the metabolic mechanism of versatile *Porphyridium purpureum* under nitrogen deprivation for exopolysaccharides accumulation. Biore-source Bioprocess 8, 73. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00426-x>.
- Joo DS and Choi SY. 2008. Effect of culture conditions on production of polysaccharides and growth rate of *Porphyridium cruentum*. Korean J Fish Aquat Sci 41, 446-451. <https://doi.org/10.5657/kfas.2008.41.6.446>.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2026. Fisheries Production Trend Survey: Statistics by Fishery Type and Species. Retrieved from <https://kosis.kr> on May 23, 2026.
- Krasovec M, Vancaester E, Rombauts S, Bucchini F, Yau S, Hemmon C, Lebretonchel H, Grimsley N, Moreau H, Sanchez-Brosseau S, Vandepoele K and Piganeau G. 2018. Genome analyses of the microalga *Picochlorum* provide insights into the evolution of thermotolerance in the green lineage. Genome Biol Evol 10, 2347-2365. <https://doi.org/10.1093/gbe/evy167>.
- Lavens P and Sorgeloos P. 1996. Manual on the Production and Use of Live Food for Aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper No. 361. FAO, Rome, Italy, 1-295.
- Leliaert F, Verbruggen H, Vanormelingen P, Steen F, Lopez-Bautista JM, Zuccarello GC and De Clerck O. 2014. DNA-based species delimitation in algae. Eur J Phycol 49, 179-196. <https://doi.org/10.1080/09670262.2014.904524>.
- Neokye EO, Wang X, Thakur KK, Quijon P, Nawaz RA and Basheer S. 2024. Climate change impacts on oyster aquaculture - Part I: Identification of key factors. Environ Res 251, 118561. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118561>.
- Rosa M and Padilla DK. 2020. Changes in food selection through ontogeny in *Crassostrea gigas* larvae. Biol Bull 238, 54-63. <https://doi.org/10.1086/706821>.
- Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E and Isambert A. 2006. Commercial applications of microalgae. J Biosci Bioeng 101, 87-96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>.
- Wu Z, Dejtsakdi W, Kermanee P, Ma C, Arirob W, Sathasivam R and Juntawong N. 2017. Outdoor cultivation of *Dunaliella salina* KU 11 using brine and saline lake water with raceway ponds in northeastern Thailand. Biotechnol Appl Biochem 64, 938-943. <https://doi.org/10.1002/bab.1537>.